Union internationale des télécommunications



Rapport UIT-R SM.2158-1
(09/2010)

Incidence des systèmes de télécommunication à courants porteurs en ligne sur les systèmes de radiocommunication fonctionnant dans les bandes de fréquences kilométriques, hectométriques, décamétriques et métriques au-dessous de 80 MHz

Série SM

Gestion du spectre



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Rapports UIT-R

(Egalement disponible en ligne: http://www.itu.int/publ/R-REP/fr)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	**Gestion du spectre**

***Note**: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique
Genève, 2011

RAPPORT UIT-R SM.2158-1

Incidence des systèmes de télécommunication à courants porteurs en ligne sur les systèmes de radiocommunication fonctionnant dans les bandes de fréquences kilométriques, hectométriques, décamétriques et métriques au-dessous de 80 MHz*, **, ***

(Question UIT-R 221/1)

(2009-2010)

TABLE DES MATIÈRES

Page

---

* L'Administration du Japon émet une réserve quant au contenu du présent Rapport en attendant d'autres contributions sur des questions spécifiques, qui doivent être présentées à la/aux prochaine(s) réunion(s) du Groupe de travail 1A.

** L'Administration de la République arabe syrienne émet une réserve quant au contenu du présent Rapport.

*** Voir également le Rapport UIT-R SM.2157.

Page

Page

1 Introduction

Dans le cadre des études sur la compatibilité entre systèmes de radiocommunication et systèmes de télécommunication à débit binaire élevé utilisant des câbles électriques ou des câbles de distribution téléphonique (Question UIT-R 221/1), le présent Rapport examine comment les télécommunications à courants porteurs en ligne (CPL) influent sur l'utilisation du spectre radioélectrique et sur les besoins afférents de protection des services de radiocommunication. Les systèmes CPL fonctionnent par transmission de signaux radiofréquences sur des lignes de puissance utilisées pour la distribution de l'électricité. Ces lignes de puissance n'étant pas conçues pour la transmission de signaux à débit binaire élevé, les signaux CPL sont susceptibles de brouiller des services de radiocommunication.

Le numéro 15.12 du RR dispose que «Les administrations doivent prendre toutes les mesures pratiques nécessaires pour que le fonctionnement des appareils et installations électriques de toute espèce, y compris les réseaux de distribution d'énergie ou de télécommunication, mais à l'exception des appareils destinés aux utilisations industrielles, scientifiques et médicales, ne puisse pas causer de brouillage préjudiciable à un service de radiocommunication, et en particulier aux services de radionavigation et autres services de sécurité, exploité conformément au présent Règlement.»«[1]

Le présent Rapport s'intéresse à l'utilisation des systèmes CPL à des fréquences inférieures à 80 MHz. En anglais, cette nouvelle famille d'applications a plusieurs dénominations: PLC (*power line communications*), BPL (*broadband over power lines*) et PLT (*power line telecommunications*). Dans le présent Rapport, nous utilisons le terme français générique CPL (courants porteurs en ligne).

1.1 Transmission de données sur lignes électriques

La signalisation sur le réseau électrique dans les bandes d'ondes myriamétriques (VLF) et kilométriques (LF) existe depuis très longtemps. De nombreuses applications de transmission à faible débit binaire sur le réseau électrique sont actuellement en service, notamment celles mises en place par les compagnies d'électricité pour leurs propres réseaux de distribution.

Depuis 1998, grâce aux évolutions technologiques des modems numériques, il est possible d'utiliser des fréquences supérieures – jusqu'à 80 MHz – et des largeurs de bandes plus importantes pour communiquer sur le réseau de distribution d'électricité.

Il existe actuellement deux grandes familles d'applications CPL:

– le CPL de type *Access* (accès), qui cible le marché du dernier mile (i.e 1,2 km) entre la sous-station de distribution d'énergie et l'abonné, et qui constitue un autre moyen d'accéder à la boucle locale de télécommunication;

– le CPL de type *Indoor* (en intérieur), dont le rôle est de transporter des signaux (provenant par exemple d'un accès CPL de type *Access* ou d'un accès ADSL) vers les prises de courant électrique qui se trouvent à l'intérieur d'un bâtiment.

En outre, l'UIT-R et l'UIT-T étudient actuellement les réseaux électriques intelligents[1].

«[1] **15.12.1** et **15.13.1** A cet égard, les administrations doivent se fonder sur les Recommandations pertinentes de l'UIT-R les plus récentes.»

[1] La question des réseaux électriques intelligents est actuellement étudiée par le Groupe spécialisé de l'UIT-T sur les réseaux électriques intelligents (FG Smart). Ce groupe a notamment pour tâche de donner une définition de ce que l'on entend par «réseaux électriques intelligents». Pour plus de précisions, voir le lien http://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/smart.

Le CPL peut offrir une vitesse de transmission atteignant plusieurs Mbit/s sur les câbles de distribution électrique que l'on trouve habituellement dans tous les bâtiments. Dans le cas du CPL de type *Access*, ce débit binaire est partagé simultanément entre plusieurs utilisateurs. Etant donné que le CPL utilise le protocole Internet (IP), on pourrait décrire sa principale application comme un «accès à Internet via la prise de courant». L'avantage du CPL réside dans le fait qu'il utilise le réseau électrique à faible tension existant et largement déployé, ce qui lui permet de proposer de nouveaux services sans pose de câbles supplémentaires. La mise en œuvre des systèmes CPL et leurs caractéristiques techniques varient considérablement selon le type d'application et le pays.

Lorsque plusieurs transformateurs de poteau alimentés par un réseau de distribution de moyenne tension desservent un petit nombre d'abonnés au service à basse tension dans une commune (ce qui est fréquent avec l'alimentation 110 V biphasée des habitations et des locaux d'entreprise) ou lorsqu'un dispositif de comptage électrique utilise des réseaux de composants capacitifs et inductifs, on observe parfois un affaiblissement important des signaux RF le long des lignes électriques à faible tension.

Cela étant, les réseaux de distribution triphasés à 220/240 V desservent parfois plus de 100 abonnés par phase à partir d'un transformateur à haute tension. Dans le cas des réseaux souterrains, le comptage électronique se généralisant, il arrive que les compteurs soient peu isolés. Dans de telles situations, plusieurs systèmes CPL peuvent finir par se partager la bande passante, d'où une réduction réelle du débit binaire disponible sur le réseau électrique de plusieurs rues ou d'un grand bâtiment et très peu d'affaiblissement entre les systèmes.

L'Annexe 4 du présent Rapport fournit plusieurs exemples d'architecture et de mise en œuvre de systèmes CPL dans le monde.

2 Caractéristiques des ondes radioélectriques émises par les systèmes CPL

2.1 Sources de rayonnement des systèmes CPL

Les lignes électriques privées sont composées de deux ou trois câbles conducteurs, à savoir la phase, le neutre et la terre, le courant électrique alternatif étant transporté par la phase et le neutre. De même, dans un système CPL à usage domestique, l'équipement CPL (modem) injecte la puissance du signal dans les fils de phase et de neutre, les signaux HF (bande des fréquences décamétriques) dans chaque fil étant normalement de même amplitude et de directions opposées. Cela étant, la plupart du temps, les courants circulant dans les deux fils possèdent des composantes qui se propagent dans la même direction. Ces composantes en phase, qui se comportent comme des courants d'antenne, sont la source principale des rayonnements non désirés émis par les systèmes CPL.

De même, sur les réseaux de distribution, lorsque la distance qui sépare les conducteurs est très inférieure à la longueur d'onde des signaux CPL, les composantes de courant HF en phase des conducteurs électriques peuvent être considérées comme des sources principales de rayonnement.

2.1.1 Courants de mode différentiel et courants de mode commun[2]

En règle générale, les signaux CPL circulant dans deux conducteurs électriques sont censés être de même amplitude et de directions opposées. Dans la théorie des lignes de transmission, ce mode de

[2] Pièce jointe 1 du Rapport technique sur le CPL à haut débit publié en japonais par le Conseil de l'information et des communications auprès du Ministère de l'Intérieur et des Télécommunications (MIC), Japon, 2006.

propagation fondamental est dénommé par différents termes techniques: mode différentiel, mode symétrique, mode équilibré, mode transverse, etc. Mais lorsque la source du signal, les lignes électriques ou la charge ne sont par symétriques d'un point de vue électrique par rapport à la terre et aux objets environnants, ou que les conducteurs électriques ne sont pas parallèles d'un point de vue géométrique, les courants circulant dans les lignes présentent des composantes qui se propagent dans la même direction. Ce mode de propagation du courant en phase est appelé mode commun, mode asymétrique ou mode longitudinal. En conséquence, le signal CPL transporté par chaque conducteur peut s'exprimer comme la somme vectorielle d'une composante en mode différentiel et d'une composante en mode commun, I_d et I_c, tel qu'indiqué à la Fig. 2-1a. Si les lignes électriques sont symétriques, ces deux modes se propagent de façon indépendante. Au niveau des éléments non symétriques du réseau électrique en revanche, les deux courants sont couplés. Etant donné que des courants CPL en mode différentiel circulant sur deux conducteurs étroitement alignés circulent dans des directions opposées, les champs électromagnétiques produits s'annulent. Il en résulte que le champ produit en des points distants des lignes est négligeable.

En revanche, les courants CPL en mode commun peuvent former des courants de boucle (voir Fig. 2-1a), et donc des champs électromagnétiques, notamment dans les bandes d'ondes hectométriques/décamétriques (MF/HF). Dans les bandes d'ondes décamétriques et dans des gammes de fréquences très supérieures, ces courants peuvent émettre des ondes électromagnétiques de façon tout à fait comparable aux antennes unipolaires et aux antennes trombones. Les courants en mode commun sont donc considérés comme la principale source de rayonnement des systèmes CPL.

Selon la norme internationale CISPR 22 éd. 5.2 (2006), il convient de limiter seulement les courants en mode commun sortant du connecteur d'alimentation électrique et des ports des équipements informatiques et de télécommunication à une valeur inférieure ou égale à 30 dBμA dans des conditions de charge spécifiées (à savoir un réseau fictif (AMN), un réseau artificiel asymétrique (AAN) ou un réseau de stabilisation d'impédance (ISN)). Mais ces mesures prévues dans la réglementation – ou d'autres mesures analogues – ne peuvent s'appliquer aux CPL, car les modems CPL injectent le signal en mode différentiel dans un réseau électrique très asymétrique, qui présente des modes commun et différentiel fortement couplés. A noter en outre que les émissions par rayonnement ne sont pas seulement dues aux courants en mode commun au niveau de la prise, mais aussi aux courants en mode commun qui circulent sur le réseau lui-même. De plus, le courant en mode commun mesuré avec le réseau artificiel asymétrique (ou le réseau de stabilisation d'impédance) sous-estimerait grandement le courant en mode commun converti et donc les émissions par rayonnement. En effet, le courant mesuré serait fortement diminué par l'impédance en mode commun du modem CPL, contrairement au courant en mode commun généré au niveau du réseau électrique lui-même[3]. Il est donc très important de décrire parfaitement les mécanismes physiques de génération des courants en mode commun sur le réseau électrique.

2.1.2 Production du courant CPL en mode commun

Les signaux CPL en mode différentiel (MD) peuvent se transformer en courants de mode commun selon deux mécanismes: d'une part, en courant de mode commun injecté (MCI) en raison de la dissymétrie du modem CPL (indiqué par les flèches rouges en pointillé à la Fig. 2-2); d'autre part, en courant de mode commun converti (MCC) en raison de la dissymétrie des lignes électriques

---

[3] DUNKER et SISOLEFSKY, *Using the T-AAN for the measurement at the mains port of PLT modems*, CISPR/A/WG1(Dunker/Sisolefsky)08-01, CISPR/I/PT PLT/(Dunker/Sisolefsky)08-01, mai 2008. http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/17349.pdf.

(indiqué par les flèches rouges en trait plein à la Fig. 2-2). La dissymétrie du réseau électrique peut s'expliquer de plusieurs manières:

– charges déséquilibrées connectées à des prises de courant;
– dérivations vers une ou plusieurs lampes de plafond et un interrupteur mural unipolaire;
– liaison de service mise à la terre en un point unique dans certains pays, tel qu'indiqué à la Fig. 2-2.

Il convient de noter que les éléments de dissymétrie du réseau électrique sont séparés des modems CPL de plusieurs mètres jusqu'à quelques dizaines de mètres. Par conséquent, les courants de mode commun converti doivent être étudiés au moyen du modèle de circuit distribué à constantes réparties ou de la théorie des lignes de transmission.

2.1.3 Courant en mode commun injecté au niveau du port de sortie du modem CPL[4]

Le circuit équivalent illustré à la Fig. 2-1b donne l'expression suivante du courant en mode commun à la position x:

$$I_c(x) = \frac{1}{Z_c(x) \cdot Z_d(x)} \left[Z_2(x) e_1(x) - Z_1(x) e_2(x) \right] \quad (2\text{-}1)$$

où les impédances en mode différentiel et en mode commun du système CPL sont:

$$Z_d(x) = Z_1(x) + Z_2(x) \text{ et } Z_c(x) = \frac{Z_1(x) \cdot Z_2(x)}{Z_1(x) + Z_2(x)} + Z_3(x) \quad (2\text{-}2)$$

respectivement, avec $Z_1(x) \equiv Z_{S1}(x) + Z_{L1}(x), \quad Z_2(x) \equiv Z_{S2}(x) + Z_{L2}(x), \quad Z_3(x) \equiv Z_{S3}(x) + Z_{L3}(x)$.

On peut déduire de ces équations que les courants en mode commun sont induits par les courants en mode différentiel du fait de la dissymétrie du réseau CPL: dissymétrie des lignes électriques, dissymétrie du modem CPL (sources de tension, e_1 et e_2, et impédances, Z_{S1} et Z_{S2}) et dissymétrie des charges connectées, Z_{L1} et Z_{L2}.

Bien que la Fig. 2-1b soit valable en général en tout point de la ligne électrique, le courant en mode commun et le déséquilibre du réseau électrique n'ont été évalués qu'au niveau d'une prise de courant[3]. L'évaluation correspond donc au courant de mode commun injecté dans la prise par le modem CPL du fait des déséquilibres du modem lui-même et du réseau électrique[3]. Or, le déséquilibre observé au niveau de la prise ne représente qu'une petite partie des déséquilibres présents sur la ligne[5].

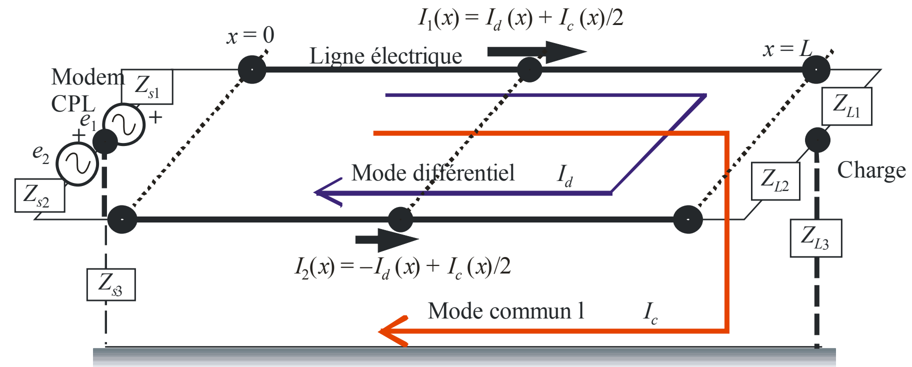
---

4 KAMI Y. et XIAO F., *Equivalent Two–Port Network for Indoor Outlet and its Application*, Proc. EMC Europe Int'l Symp. on EMC, p. 420-425, Barcelone, Espagne, 2006.

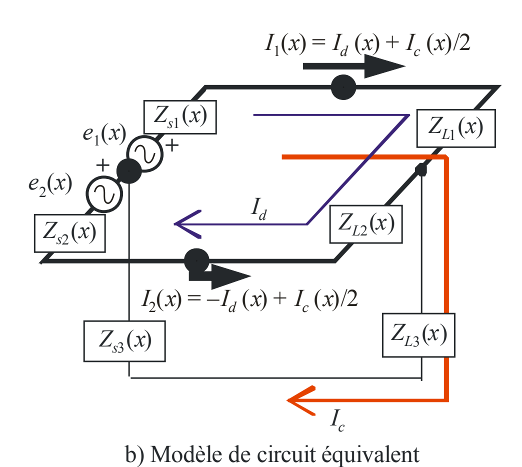
5 KITAGAWA M., *LCL and Common Mode Current at the Outlet Do Not Tell the Common Mode Current Generated at the Remote Unbalanced Element on the Power-line*, Proc. EMC Zurich 2009, p.1-4, Zurich, Suisse.

FIGURE 2-1

Modèle des lignes de transmission d'un système CPL et son circuit équivalent



a) Modèle de lignes de transmission

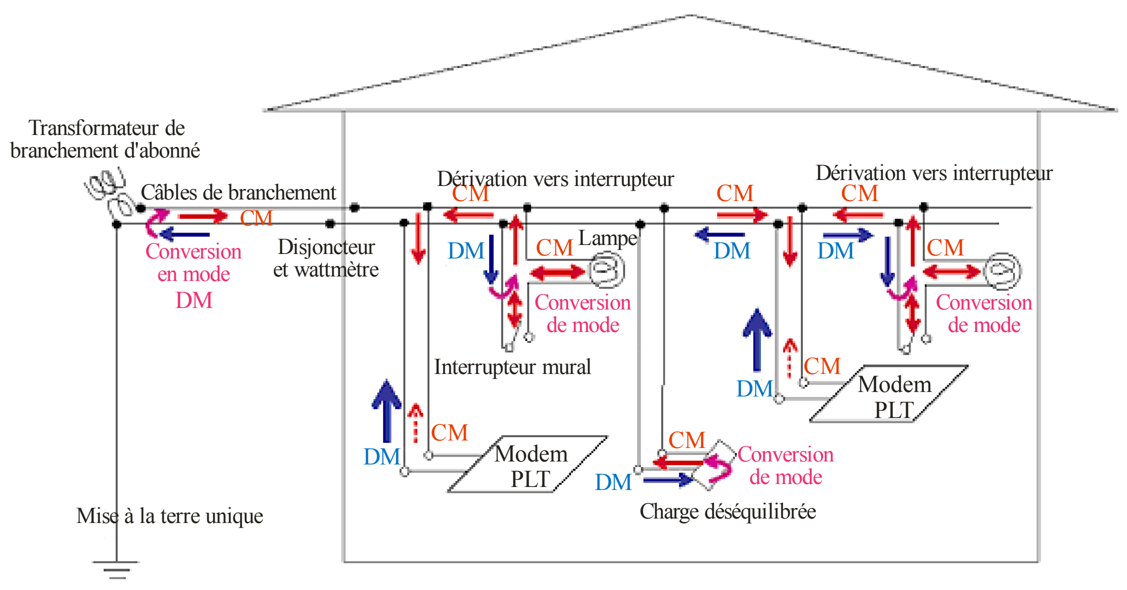


b) Modèle de circuit équivalent

Report 2158-2-01

FIGURE 2-2

Courants en mode commun sur le réseau électrique



Report 2158-2-02

2.1.3.1 Caractéristiques électriques des câbles intérieurs au niveau d'une prise

Il convient de noter que les mesures, au niveau des prises murales, des impédances en mode différentiel et en mode commun et de l'affaiblissement de conversion longitudinale ne rendent pas nécessairement compte des caractéristiques électriques et des rayonnements éventuels de l'ensemble des câbles intérieurs. En effet, le réseau électrique doit être analysé comme un circuit distribué. Les valeurs mesurées sont des «valeurs locales», autrement dit, elles ne sont pas valables pour l'ensemble de la ligne de puissance. Cela étant, elles peuvent apporter des informations utiles sur les caractéristiques des lignes électriques intérieures.

Comme indiqué aux paragraphes précédents, le rayonnement non désiré des systèmes CPL est généralement dû aux courants en mode commun issus de la transformation des signaux (de mode différentiel) qui circulent dans les lignes électriques. Il en résulte que les caractéristiques des lignes électriques, notamment les impédances en mode commun/différentiel et la symétrie électrique, sont des facteurs clés de l'analyse du rayonnement CPL. Un grand nombre de mesures a donc été effectué au niveau des prises électriques murales dans diverses habitations au Japon, y compris des maisons en bois et des appartements en béton armé.

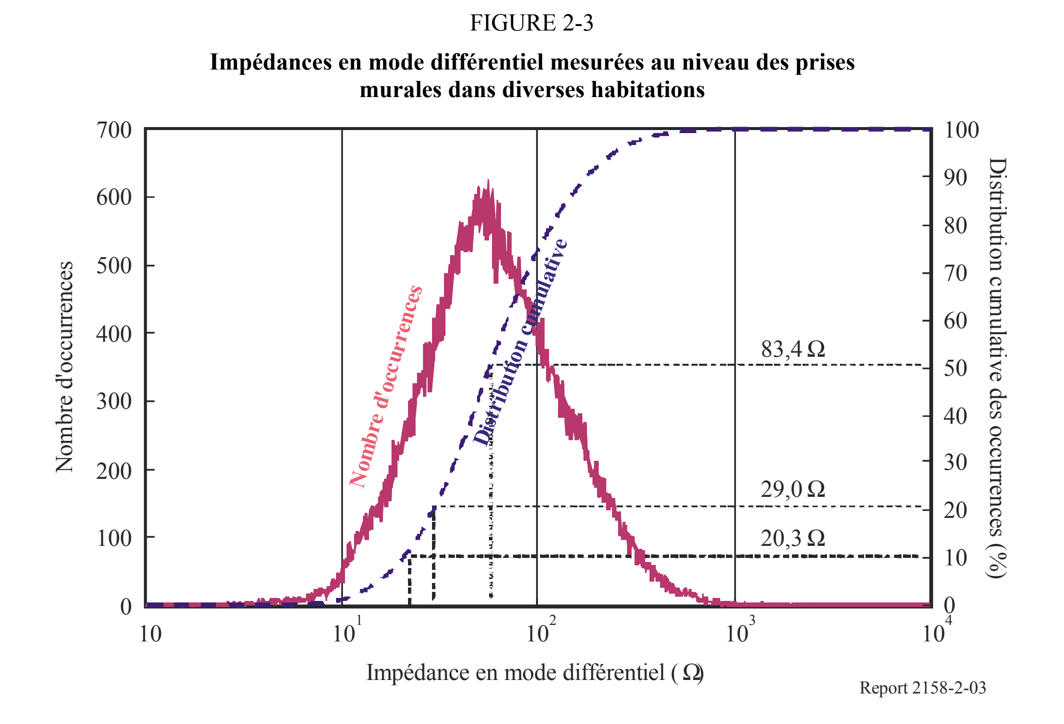
2.1.3.2 Impédances des lignes électriques intérieures mesurées au niveau d'une prise

L'équation (2-2) le montre, les impédances en mode différentiel et en mode commun des lignes électriques réelles varient largement avec la fréquence et le moment de la mesure ainsi qu'avec la position. De plus, elles sont considérablement modifiées par les appareils ménagers et autres équipements électriques/électroniques connectés au secteur. Pour étudier les caractéristiques d'impédance, il convient donc d'adopter une approche statistique.

La Fig. 2-3 présente l'impédance en mode différentiel des lignes électriques mesurée au niveau de plusieurs prises murales dans diverses habitations. Sur cette figure, on observe que, dans la plupart des cas, les impédances en mode différentiel des lignes électriques se situent au voisinage de 100 Ω. Cette mesure est conforme aux spécifications définies dans le document CISPR 16-1-2 ed. 1.2 (2006) relatives à la charge (pour un réseau fictif) utilisée dans les essais de conformité des équipements.

FIGURE 2-3

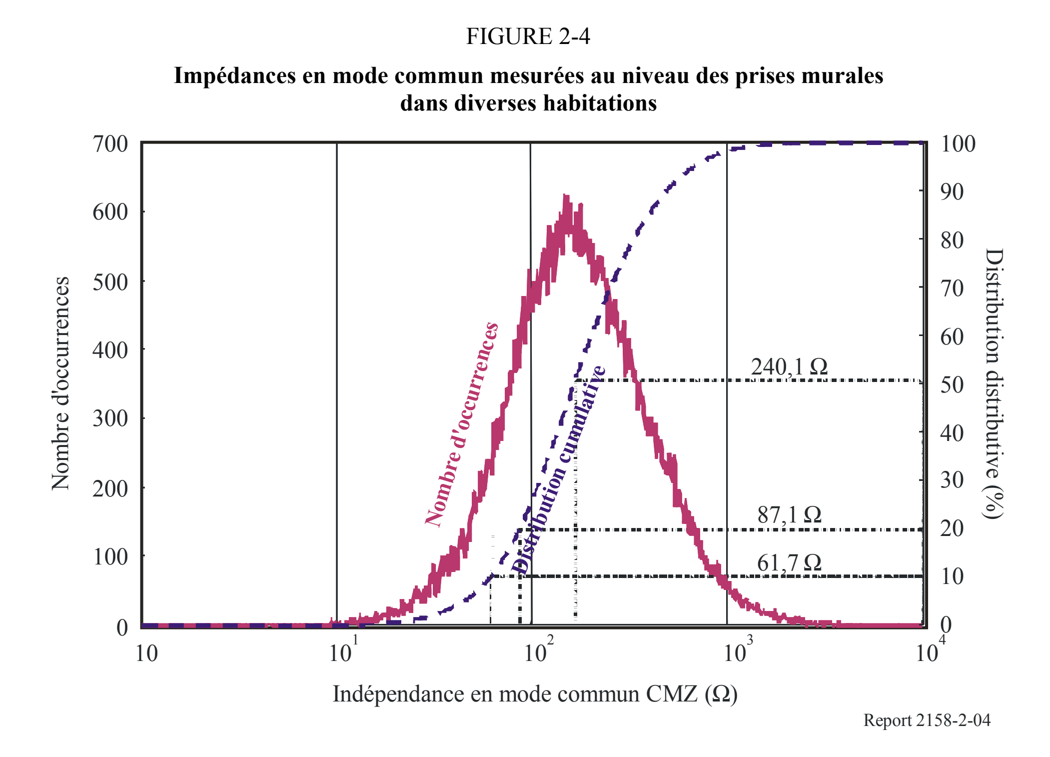
Impédances en mode différentiel mesurées au niveau des prises murales dans diverses habitations



La Fig. 2-4, qui fournit l'impédance en mode commun mesurée au niveau d'un grand nombre de prises murales, montre sans équivoque que les impédances en mode commun sont généralement supérieures à 100 Ω. Or le document CISPR 16-1-2 spécifie une impédance en mode commun de 25 Ω pour la charge d'essai, car une faible impédance permet de mettre en relief les caractéristiques de dissymétrie de l'équipement en essai (EUT), comme le montre l'équation (2-1).

FIGURE 2-4

Impédances en mode commun mesurées au niveau des prises murales dans diverses habitations

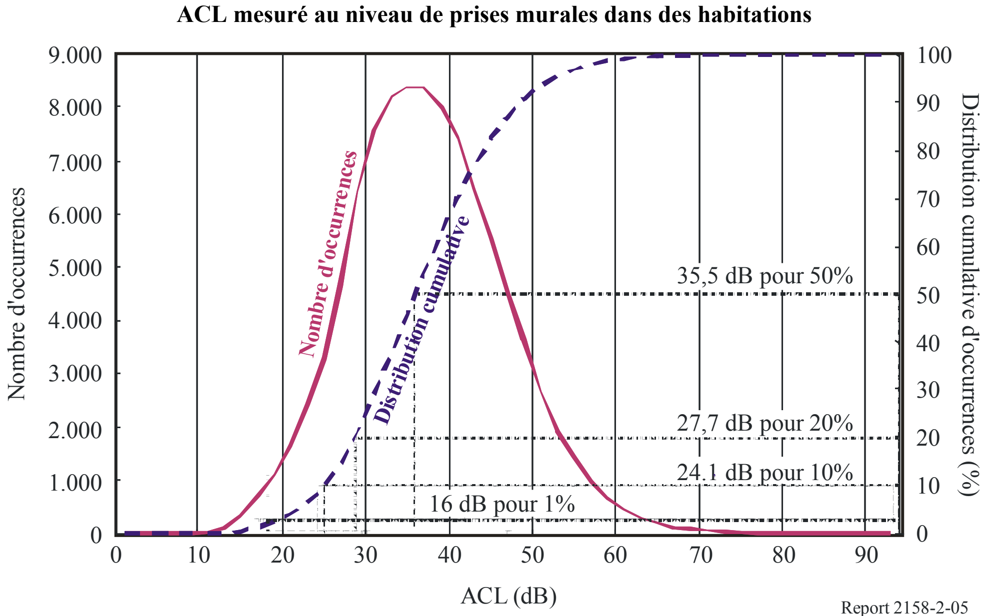


2.1.3.3 Dissymétrie des lignes électriques intérieures mesurées au niveau d'une prise

La Fig. 2-5 montre les valeurs de l'ACL (affaiblissement de conversion longitudinale) mesurées au niveau de plusieurs prises murales dans diverses habitations japonaises. L'ACL est un paramètre représentant la dissymétrie d'un système de lignes parallèles, défini comme le rapport de la tension appliquée en mode commun et de la tension en mode différentiel induite au niveau d'un accès multi-terminal. Les lignes bien équilibrées telles que les câbles à paires téléphoniques non blindés ont généralement un ACL supérieure à 50 dB. L'ACL est fonction des impédances en mode différentiel et en mode commun vues du point d'accès. Etant donné que ces impédances de lignes électriques varient considérablement avec le temps, la fréquence et la position, l'intervalle de valeurs d'ACL est très important: de 20 dB à 60 dB, comme le montre la Fig. 2-5.

FIGURE 2-5

ACL mesuré au niveau de prises murales dans des habitations



2.1.4 Courant en mode commun converti

2.1.4.1 Courant en mode commun converti produit au niveau d'un élément distant déséquilibré[5]

Comme le montre la Fig. 2-2, les éléments déséquilibrés du réseau électrique sont éloignés du modem CPL. Le système doit donc être étudié au moyen du modèle de circuit distribué à constantes réparties ou de la théorie des lignes de transmission. Le modèle le plus simple permettant d'analyser une telle configuration est présenté aux Figs 2-6 et 2-7.

FIGURE 2-6

Modèle le plus simple permettant d'évaluer le courant en mode commun converti

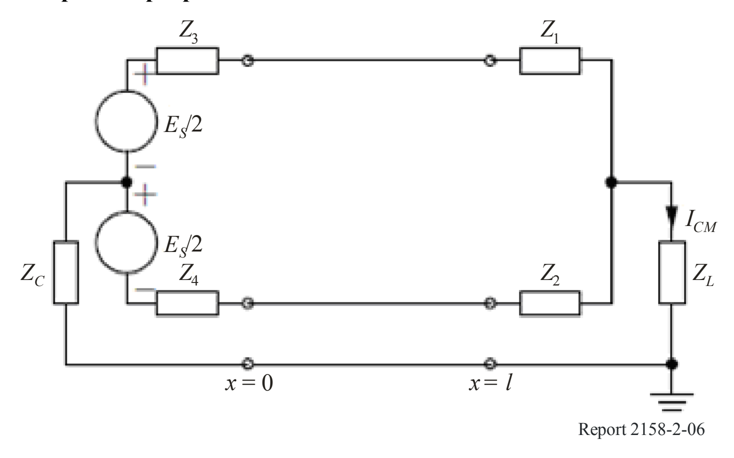
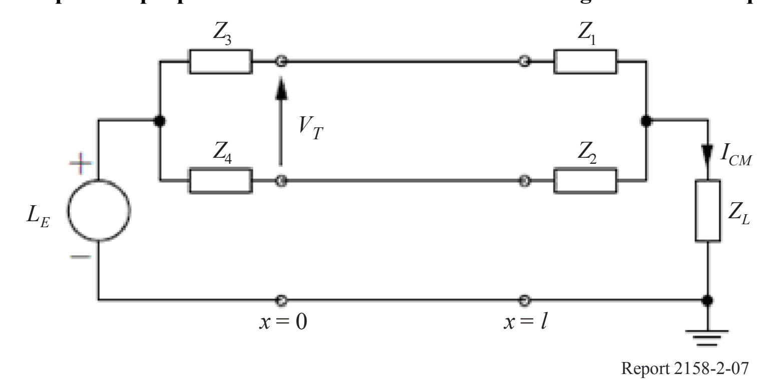


FIGURE 2-7

Modèle le plus simple permettant d'évaluer l'ACL d'une charge distante déséquilibrée



L'analyse théorique de la Fig. 2-6 permet de déduire le courant en mode commun produit au niveau de la charge déséquilibrée séparée du modem CPL par une distance *l*:

$$I^{-}_{MC}(l) = \kappa I^{+}_{MD}(l) = \kappa I^{+}_{MD}(0)\exp(-\gamma l)$$

où:

$I^{+}_{MD}(0)$: courant en mode différentiel injecté par le modem CPL au niveau de la prise

γ: constante d'affaiblissement du mode différentiel

κ: est donné par:

$$\frac{-\Delta Z_0}{(Z'_{MC} + Z_{0c})\,(Z_{MD} + Z_0)}$$

où Z_0 et Z_{0c} sont les impédances caractéristiques du mode différentiel et du mode commun respectivement, et

$$Z_{MD} = Z_2 + Z_1$$
$$Z_{MC} = Z_L + Z_1 // Z_2 = Z_L + Z_{MD}/4 - \Delta^2 / 4Z_{MD}$$
$$Z_L + Z_{MD}/4 - \Delta^2 / 4(Z_{MD} + Z_0)$$
$$Z''_{MC} = Z_L + Z_{MD} / 4$$

Il importe de noter qu'une augmentation de l'impédance en mode commun du modem CPL ne diminue pas le courant en mode commun converti produit au niveau de l'élément distant déséquilibré.

La relation entre le courant en mode commun et l'ACL est en général relativement complexe du fait des réflexions multiples du courant en mode commun entre les deux extrémités de la ligne de transmission, réflexions qui ne sont pas exactement les mêmes dans les Figs 2-6 et 2-7 au niveau de la prise. Cela étant, si l'on considère le cas d'une diminution des réflexions multiples du fait de l'affaiblissement du mode commun et que l'on pose, par souci de simplicité, $Z_{MD} = Z_0$, on obtient les relations simples suivantes:

$$\left|\frac{I^{-}_{MC,all}(l)}{I^{+}_{MD}(0)}\right| \approx |\kappa| \exp(-\alpha l) \approx \frac{1}{\mathrm{ACL}_E}$$

$$\left|\frac{I^{-}_{MC,all}(l)}{I^{+}_{MD}(0)}\right| \approx \frac{1}{\mathrm{ACL}_0}$$

et

$$\mathrm{ACL}_R = \mathrm{ACL}_0 \exp(-\alpha_c l)$$

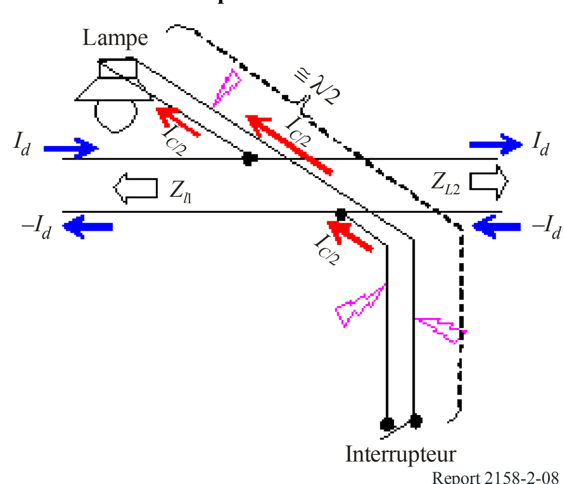
où ACLR_R représente l'affaiblissement réel entre le courant en mode différentiel injecté au niveau de la prise par le modem CPL et le courant en mode commun converti produit au niveau de la charge distante déséquilibrée, ACL_0 représente l'affaiblissement de conversion longitudinale mesuré au niveau de la prise, et α_c la constante d'affaiblissement en mode commun de la ligne. Par conséquent, en mesurant l'ACL au niveau de la prise, on surestime l'affaiblissement de conversion réel d'une quantité égale à l'affaiblissement en mode commun entre la prise et l'élément distant déséquilibré. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'ACL au niveau de la prise n'est pas une mesure correcte de la dissymétrie de la ligne et ne peut être utilisé comme une mesure de l'affaiblissement de conversion entre le courant en mode différentiel et le courant en mode commun produit sur le réseau électrique. L'autre raison tient au courant d'antenne caché qui circule dans la dérivation vers l'interrupteur. Elle est détaillée dans ce qui suit.

2.1.4.2 Effet d'antenne trombone de la dérivation vers l'interrupteur

Les maisons et les bâtiments contiennent de nombreux circuits de dérivation connectés en parallèle avec le réseau électrique fédérateur. A certaines fréquences, lorsque la longueur de la dérivation s'approche d'une demie longueur d'onde, le circuit de dérivation se comporte comme une antenne trombone, comme illustré à la Fig. 2-8. La dérivation résonnante émet alors des ondes électromagnétiques. L'amplitude des courants en mode commun dans la dérivation dépend de la longueur et des charges de cette dernière, de la position des points de connexion et des impédances des lignes du réseau électrique fédérateur vues au niveau de ces points. Ces facteurs varient d'une dérivation à l'autre, le nombre de dérivations vers des interrupteurs étant égal au nombre de pièces de la maison. Le scénario le plus défavorable est donc *a priori* inévitable. Le courant d'antenne maximum dans le dipôle replié est deux fois plus important que le courant en mode différentiel qui entre au niveau du point d'alimentation. L'affaiblissement de conversion intrinsèque entre le courant en mode différentiel et le courant en mode commun est donc de –6 dB

FIGURE 2-8

Antenne trombone formée par une dérivation vers un interrupteur*



* SUGIURA A., KAMI Y., AMEMIYA F. et YAMANAKA Y., *Technical Requirements for the Broadband PLT in Japan*, IEICE Techni. Rep. (japonais), Vol. EMCJ2007-36, 2007.

Le courant en mode différentiel au niveau du point d'alimentation de l'antenne trombone est diminué de 5 à 10 dB par rapport au courant en mode différentiel injecté au niveau de la prise par le modem CPL, car l'affaiblissement entre deux connexions sur un circuit commun est évalué entre 10 et 20 dB[1]. De même que l'impédance en mode différentiel des lignes du réseau électrique fédérateur au niveau du point d'alimentation de l'antenne trombone n'est pas connue, de même l'affaiblissement dû aux cloisons ne l'est pas non plus. Dans l'hypothèse où cet affaiblissement est de 3 dB, l'ACL réel total de l'antenne trombone est estimé entre 2 et 7 dB.

Ces valeurs, proches du scénario le plus défavorable, ne s'appliquent qu'à une seule dérivation d'interrupteur. Or il y a, dans toute habitation, de nombreuses dérivations de cette nature. Les rayonnements cumulés provenant de nombreuses dérivations doivent donc être pris en compte et on ne saurait affirmer à juste titre que toutes les configurations s'éloignent du scénario le plus défavorable. En conséquence, l'ACL réel représentant l'effet d'antenne trombone des dérivations d'interrupteur sur le réseau électrique est estimé de quelques décibels à plusieurs décibels. A noter que le courant d'antenne dans le trombone formé par la dérivation n'est pas visible des lignes du réseau fédérateur ni des prises de courant, autrement dit, l'ACL mesuré au niveau des prises n'englobe pas l'effet d'antenne trombone dû aux dérivations. Par conséquent, l'ACL mesuré au niveau de la prise ne peut jamais être utilisé comme un baromètre des courants d'antenne produits dans le réseau électrique, et ce en raison du signal en mode différentiel provenant des modems CPL.

2.1.4.3 Conversion de mode au niveau de la dérivation d'interrupteur

Les dérivations d'interrupteur convertissent le courant de mode différentiel en courant de mode commun et inversement, et ce même lorsqu'elles ne forment pas des antennes trombones. La dérivation d'interrupteur, qui consiste en une lampe de plafond et un interrupteur mural unipolaire (voir Fig. 2-9a), est modélisée par une ligne de transmission comportant un stub en court-circuit en série, comme illustré à la Fig. 2-9b. Ce modèle fait ci-après l'objet d'une analyse[6]. L'un des deux

---

[6] KITAGAWA, M., [November 2008] Hidden antenna current in domestic power-line network. IEICE Tech. Rep., Vol. 108, **307**, EMCJ2008-78, p. 21-26.

courants en mode différentiel qui entrent dans la dérivation d'interrupteur passe à travers un stub en court-circuit de longueur *l* et provoque deux effets:

– d'une part, le stub en court-circuit rayonne comme une antenne unipolaire repliée de longueur *l*;

– d'autre part, le stub en court-circuit retarde la phase du courant de $2\theta = 2\beta l$, où $\beta = 2\pi/\lambda$.

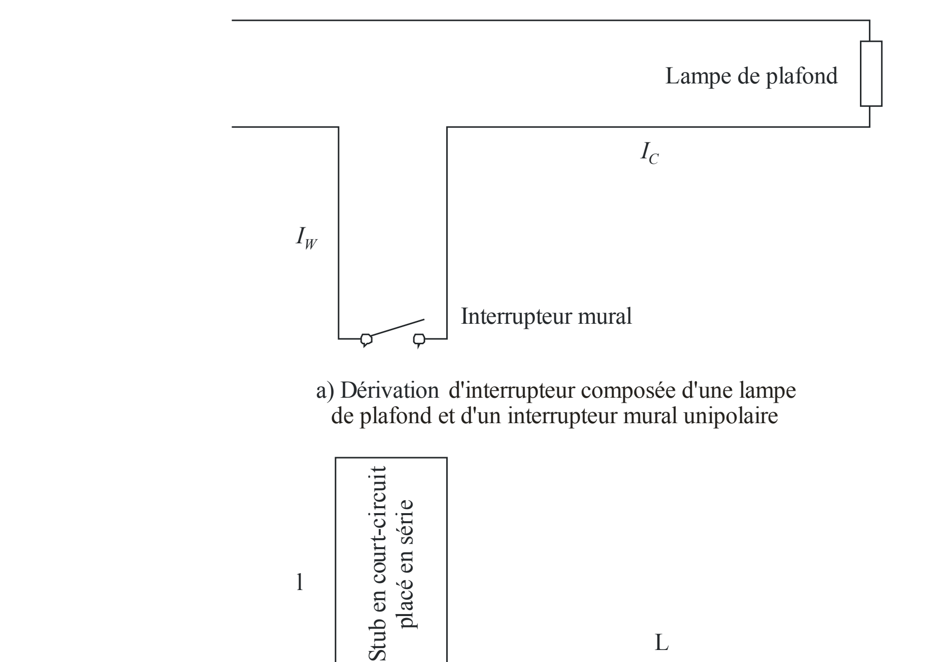
Le premier effet est maximal lorsque la longueur du stub en court-circuit, *l*, est égale au quart de la longueur d'onde du signal. Dans ces conditions, le courant rayonnant est deux fois plus important que le courant en mode différentiel. Le deuxième effet est à l'origine de la conversion entre le courant en mode différentiel et le courant en mode commun. Le facteur de conversion de mode, qui correspond au rapport de puissance des modes en entrée et en sortie du stub, est $\eta = \sin^2\theta$. Il est représenté à la Fig. 2-9c. Dans l'exemple classique ou $l = 3$ m, le facteur de conversion de mode vaut 50% (ou –3 dB) à 12,5 MHz et 100% à 25 MHz. A noter que ce facteur est relativement élevé sur la totalité de la bande des fréquences décamétriques et dans la partie inférieure de la bande des fréquences métriques.

Le courant en mode différentiel qui entre dans la dérivation d'interrupteur est partiellement converti en courant de mode commun par le décalage de phase au niveau du stub en court-circuit placé en série. Le courant en mode commun converti circulant le long de la ligne de transmission de longueur *L* est réfléchi à 100% au niveau de la charge et partiellement converti en retour en courant de mode différentiel au niveau du stub. Le courant de mode différentiel qui subit deux conversions de mode au niveau du stub en court-circuit apparaît comme s'il avait été simplement réfléchi par la dérivation d'interrupteur. Or il a également produit, dans la dérivation, un courant de mode commun. Le courant de mode différentiel qui ne subit qu'une seule conversion de mode au niveau du stub alimente le courant de mode commun de la ligne du réseau fédérateur. Le facteur de conversion de mode externe, c'est-à-dire le rapport de puissance entre le mode commun en sortie et le mode différentiel en entrée de la dérivation d'interrupteur, est égal à $\xi = \eta(1\text{-}\eta) = \sin^2 2\theta/4$. Il est représenté à la Fig. 2-9c. Ce facteur de conversion de mode externe atteint 25% ou –6 dB. La dérivation d'interrupteur produit un couplage fort entre le mode différentiel et le mode commun.

Les effets de la conversion de mode externe due à la dérivation d'interrupteur pourraient être partiellement observés au niveau de la prise de courant. Cela étant, comme le facteur de conversion de mode interne η et le facteur de conversion de mode externe ξ peuvent être corrélés positivement ou négativement, le facteur de conversion de mode interne et le courant d'antenne produit à l'intérieur de la dérivation ne peuvent être estimés à partir de l'ACL observé au niveau de la prise, qui risque de ne refléter que partiellement les effets de la conversion de mode externe de la dérivation.

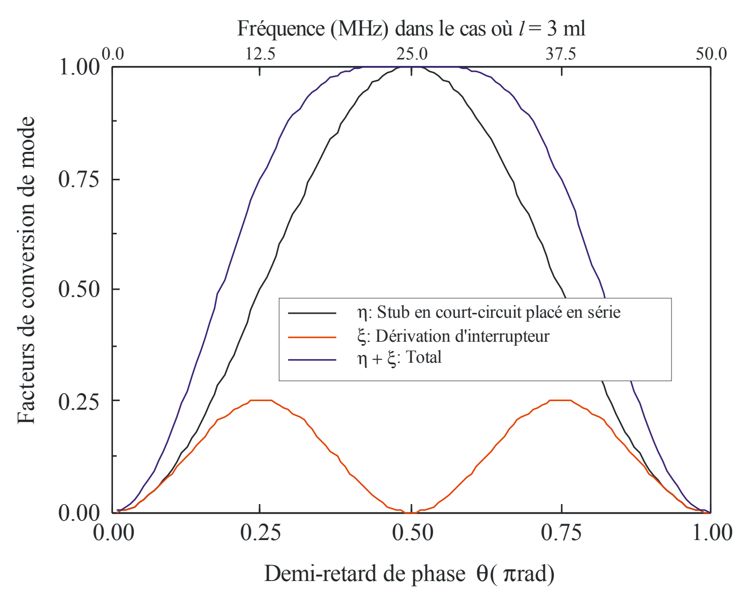
FIGURE 2-9

Conversion de mode au niveau de la dérivation d'interrupteur



a) Dérivation d'interrupteur composée d'une lampe de plafond et d'un interrupteur mural unipolaire

b) Modélisation de la dérivation d'interrupteur par un stub en court-circuit placé en série



c) Facteurs de conversion de mode stub en court-circuit placé en série et de la dérivation d'interrupteur

Report 2158-2-09

2.1.5 Fuite de la ligne électrique intérieure vers les câbles de branchement d'abonnés situés à l'extérieur du bâtiment

Les systèmes CPL de type *Indoor* soulèvent de grandes inquiétudes en raison des brouillages causés par les fuites de signaux CPL vers l'extérieur des habitations. Etant donné que les câbles de branchement d'abonnés situés à l'extérieur des bâtiments ne sont pas blindés, qu'ils peuvent

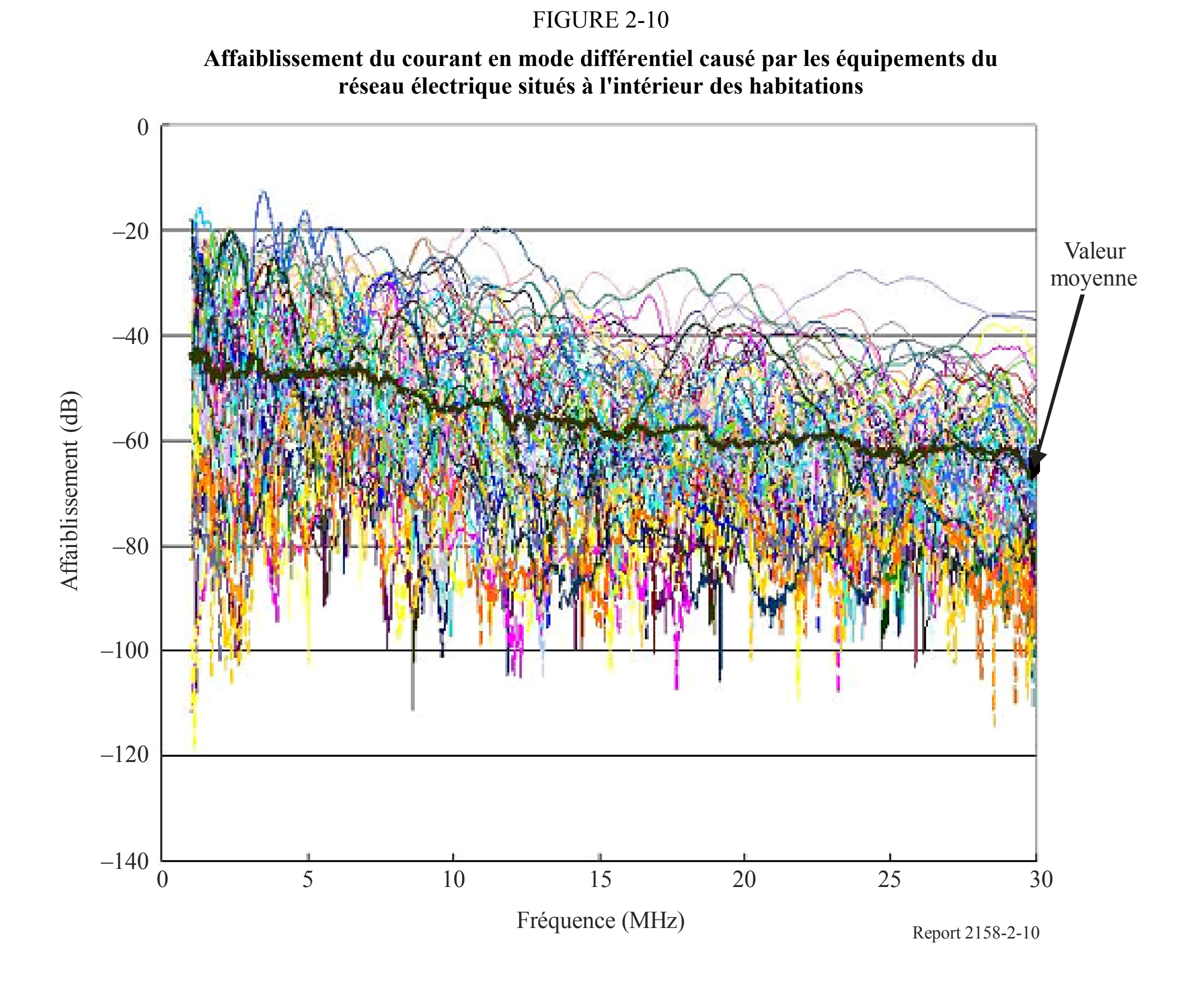
atteindre plusieurs dizaines de mètres de longueur et qu'ils se situent à quasiment dix mètres au-dessus du sol, le courant en mode commun qu'ils transportent risque fortement de brouiller les services radioélectriques qui exploitent les bandes de fréquences hectométriques (MF) et décamétriques (HF). En outre, dans certains pays, les câbles de branchement d'abonnés sont mis à la terre en un point unique au niveau des transformateurs, sont fortement dissymétriques et sont susceptibles de convertir le courant de mode différentiel en courant de mode commun dans des proportions assez importantes. Par conséquent, il convient d'étudier avec soin les problèmes de fuite de courants en mode commun et en mode différentiel du réseau électrique intérieur vers les câbles de branchement d'abonnés extérieurs. Or, les paragraphes suivants le montrent, les données existantes divergent et il serait donc nécessaire de mener des études complémentaires sur le sujet.

2.1.5.1 Données optimistes

On trouve, au niveau de l'interface entre les lignes d'accès aux abonnés et les lignes situées à l'intérieur des habitations, des wattmètres, des disjoncteurs et des circuits de distribution, autant d'éléments qui sont susceptibles d'affaiblir les signaux CPL. Plusieurs mesures ont été effectuées sur les tensions de mode différentiel à l'intérieur et à l'extérieur d'habitations afin d'évaluer l'affaiblissement d'insertion produit par les équipements du réseau électrique, notamment les circuits de distribution. Les résultats, illustrés à la Fig. 2-10, montrent que ces équipements de réseau peuvent affaiblir le signal différentiel des CPL de plus de 20 dB dans la quasi-totalité des cas.

FIGURE 2-10

Affaiblissement du courant en mode différentiel causé par les équipements du réseau électrique situés à l'intérieur des habitations



2.1.5.2 Données pessimistes

L'autre exemple[7], illustré à la Fig. 2-11, montre que:

– le courant en mode différentiel mesuré sur les câbles de branchement d'abonné juste à l'extérieur de l'habitation est inférieur de 0 à 30 dB à celui mesuré à la sortie du disjoncteur situé à l'intérieur;

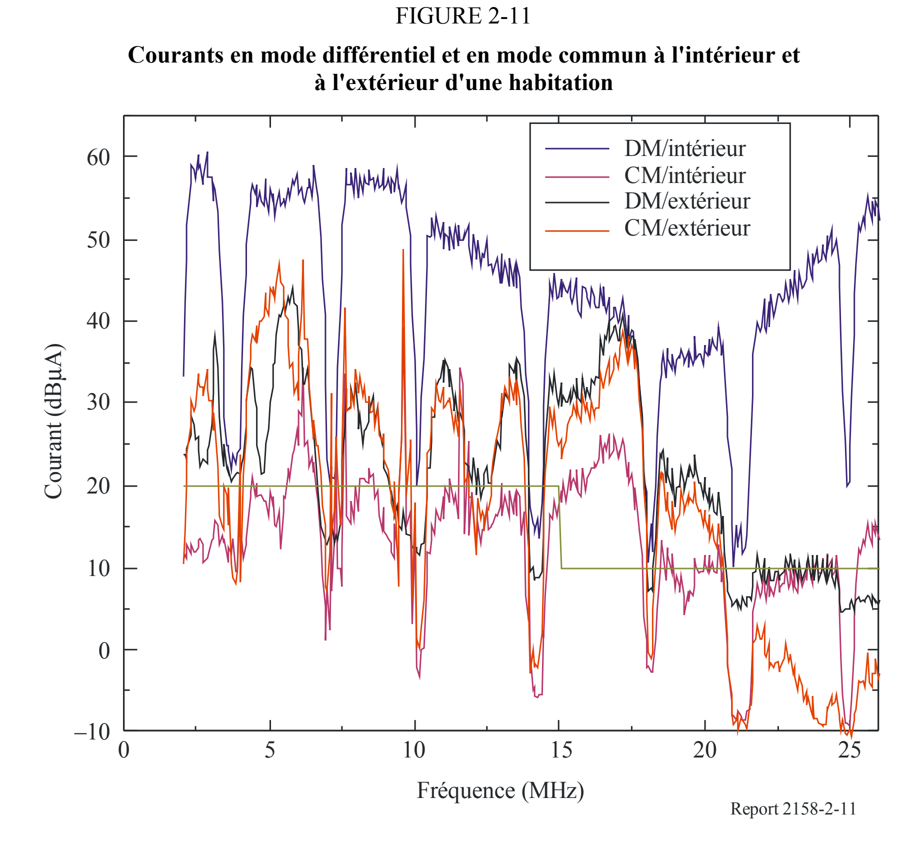
– le courant en mode commun mesuré sur les câbles de branchement d'abonné juste à l'extérieur de l'habitation est très proche du courant en mode différentiel mesuré au même point;

– le courant en mode commun mesuré sur les câbles de branchement d'abonné juste à l'extérieur de l'habitation est supérieur de 10 à 30 dB au courant en mode commun mesuré à la sortie du disjoncteur situé à l'intérieur.

Le deuxième point ci-dessus traduit le fait qu'au Japon, les câbles de branchement d'abonné sont mis à la terre en un point unique, au niveau du transformateur, et que le courant de mode différentiel est converti à 100% en courant de mode commun. Le troisième point tend à indiquer que les rayonnements émis par les câbles de branchement d'abonné peuvent être supérieurs de 20 à 47 dB aux rayonnements émis par les lignes électriques situées à l'intérieur de l'habitation si les effets d'écran de l'habitation indiqués au Tableau 2-1 sont appliqués.

FIGURE 2-11

Courants en mode différentiel et en mode commun à l'intérieur et à l'extérieur d'une habitation



[7] KITAGAWA, M. and OHISHI, M., [March 2008] Measurements of the Radiated Electric Field and the common Mode Current from the In-house Broadband Power Line Communications in Residential Environment III. IEICE Tech. Rep., Vol. 107, **533,** EMCJ2007-117, p. 1-6.

2.1.6 Efficacité de l'effet écran des murs extérieurs d'une habitation[8]

Les murs extérieurs et les plafonds d'une habitation peuvent, dans une certaine mesure, faire écran aux champs électromagnétiques rayonnés par les lignes électriques. Une analyse numérique utilisant un code de calcul basé sur la technique d'intégration finie a été menée pour étudier les fuites des champs électromagnétiques produits par un système CPL situé dans différents types d'habitation, notamment une maison en bois et un bâtiment en béton armé. Pour cette analyse, l'efficacité de l'effet écran a été définie comme le rapport entre l'intensité du champ maximal à une distance de 10 m produit par des lignes électriques non situées à l'intérieur d'une habitation et l'intensité du champ maximal à une distance de 10 m produit par des lignes électriques situées à l'intérieur de l'habitation. Les résultats varient considérablement en fonction de la structure de l'habitation, de la disposition des lignes électriques et de la fréquence. Les valeurs moyennes de l'efficacité de l'effet écran obtenues figurent au Tableau 2-1. A noter que ces valeurs n'ont pas été vérifiées par des mesures.

TABLEAU 2-1

Efficacité de l'effet écran du mur extérieur d'une habitation

	Maison en bois	Maison en béton armé
2-10 MHz	17 dB	27 dB
10-30 MHz	10 dB	27 dB

3 Caractéristiques des systèmes radioélectriques, critères de protection et incidence des systèmes CPL sur les systèmes de radiocommunication

3.1 Radiodiffusion

3.1.1 Caractéristiques générales des systèmes de radiodiffusion analogique[9] dans les bandes de fréquences kilométriques (LF), hectométriques (MF) et décamétriques (HF)

Les caractéristiques physiques et paramètres techniques suivants sont utilisés pour planifier les services de radiodiffusion analogique pour des fréquences inférieures à 10 MHz.

3.1.1.1 Largeur de bande

La largeur de bande d'un récepteur moderne à modulation d'amplitude est classiquement de 4,4 kHz. On trouve cependant des systèmes avec des largeurs de bande différentes, certains récepteurs modernes disposant d'ailleurs d'une fonction de sélection de ce paramètre.

3.1.1.2 Bruit du récepteur

Outre le bruit atmosphérique et le bruit artificiel, il convient de prendre en compte le bruit intrinsèque du récepteur.

---

8 ISHIGAMI S., GOTOH K. et MATSUMOTO Y., «Effect of structure and materials of building on electromagnetic fields generated by indoor power line communication systems», Proc. on EMC Europe Workshop 2007, juin 2007.

9 On procède actuellement à des études des paramètres de planification adaptés à la radiodiffusion numérique dans les bandes d'ondes décamétriques.

Le niveau de bruit intrinsèque du récepteur E_i^0 est calculé par la formule:

$$E_i^0(\text{dB}(\mu\text{V/m})) = E_C\ (\text{dB}(\mu\text{V/m})) + 20 \log M - SNR_{af}$$

où:

E_c : sensibilité du récepteur limitée par le bruit

M : profondeur de modulation

SNR_{af} : rapport signal/bruit en audiofréquence

Selon la Recommandation UIT-R BS.703, la sensibilité minimale d'un récepteur de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude est donnée par le tableau suivant:

	LF	**MF**	**HF**
E_C dB(μV/m)	66	60	40

d'où:

	LF	**MF**	**HF**
M	0,3	0,3	0,3
SNR_{af} (dB)	32	32	26
E_i^0 dB(μV/m)	23,5	17,5	3,5

3.1.1.3 Champ minimal utilisable

Le bruit de fond utilisé dans le calcul de l'intensité de champ minimale requise est déterminé par la plus grande des trois valeurs suivantes: bruit atmosphérique, bruit artificiel et bruit intrinsèque du récepteur. Les valeurs résultantes de bruit (quel qu'en soit la cause), E_n, se situent en règle générale entre 3,5 et 7 dB(μV/m) dans les bandes de fréquences qui nous occupent. On considère que le rapport signal/bruit RF, SNR_{RF}, est égal à 34 dB pour les fréquences décamétriques (HF) et à 40 dB pour les fréquences kilométriques (LF) et hectométriques (MF). Le calcul du champ minimal utilisable, F_{min}, donne:

	LF	**MF**	**HF**
E_n dB(μV/m)	20	20	3,5-7
SNR_{RF} (dB)	40	40	34
F_{min} dB(μV/m)	60	60	37,5-41

3.1.1.4 Rapports de protection

Les rapports de protection dans le même canal et les rapports de protection du canal adjacent indiqués ci-dessous sont valables pour la protection des transmissions de diffusion par modulation d'amplitude contre d'autres transmissions utilisant le même type de modulation, mais ne s'appliquent pas à la protection contre d'autres services.

Rapport de protection dans le même canal

Note de qualité	LF	MF	HF
3 (passable)	27 dB	27 dB	17 dB
4 (bonne)	30 dB	30 dB	27 dB

Rapport de protection du canal adjacent

ΔF_{kHz}	LF	MF	HF
0	0-9[(1)]	0-9	0
±2	+10	+10	+10
±5	–3	–3	–3
±10	–35	–35	–35

(1) L'intervalle de valeurs correspond à différents degrés de compression de la modulation et différentes largeurs de bande (par exemple 4,5 kHz/10 kHz).

3.1.2 Caractéristiques générales des systèmes de radiodiffusion numérique DRM[10] dans les bandes de fréquences kilométriques (LF), hectométriques (MF) et décamétriques (HF)

Les caractéristiques physiques et paramètres techniques suivants sont utilisés pour planifier les services de radiodiffusion numérique pour des fréquences inférieures à 10 MHz. Ils correspondent aux caractéristiques spécifiquement définies pour le système Digital Radio Mondiale (DRM). Pour offrir un service adapté à de nombreuses conditions de propagation et de brouillages, le système DRM spécifie différents modes de fiabilité, types d'occupation spectrale, méthodes de modulation et niveaux de protection. Les combinaisons possibles de ces caractéristiques fournissent un éventail de valeurs de *S*/*N*, du champ minimal utilisable, etc., qui sont brièvement indiquées dans les paragraphes suivants.

3.1.2.1 Modes de fiabilité du système DRM

La spécification DRM définit quatre modes de fiabilité correspondant à des paramètres différents (nombre et espacement des sous-porteuses, durée d'un symbole et durée de l'intervalle de garde, etc.) pour le mode de transmission MROF (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) dans diverses conditions de propagation dans les bandes de fréquences kilométriques (LF), hectométriques (MF) et décamétriques (HF):

Mode de fiabilité	Conditions de propagation types	Bandes de fréquences préférentielles
A	Canaux de propagation par l'onde de sol, avec évanouissements légers	LF, MF
B	Canaux sélectifs en fréquence et en temps, avec étalement plus large du temps de transmission	MF, HF
C	Comme pour le mode de fiabilité B, mais avec un étalement Doppler plus large	HF uniquement
D	Comme pour le mode de fiabilité B, mais avec de forts étalements des temps de transmission et Doppler	HF uniquement

10 On procède actuellement à des études des paramètres de planification adaptés à la radiodiffusion numérique dans les bandes d'ondes décamétriques.

3.1.2.2 Types d'occupation spectrale

Pour chaque mode de fiabilité, la largeur de bande occupée par le signal peut varier en fonction de la bande de fréquences et de l'application souhaitée.

	Largeur de bande occupée par le signal (kHz)			
Mode de fiabilité	Type d'occupation spectrale			
	0	1	2	3
A	4,208	4,708	8,542	9,542
B	4,266	4,828	8,578	9,703
C	–	–	–	9,477
D	–	–	–	9,536
Largeur de bande nominale (kHz)	4,5	5	9	10

3.1.2.3 Modulation et niveaux de protection

Pour tous les modes de fiabilité, deux systèmes de modulation différents (MAQ-16 ou MAQ-64) sont définis. Ils peuvent être associés à un niveau de protection parmi deux (MAQ-16) ou quatre (MAQ-64).

Modulation	Niveau de protection	Taux de codage moyen
MAQ-16	0	0,5
MAQ-16	1	0,62
MAQ-64	0	0,5
MAQ-64	1	0,6
MAQ-64	2	0,71
MAQ-64	3	0,78

3.1.2.4 Bruit du récepteur

Outre le bruit atmosphérique et le bruit artificiel, il convient de prendre en compte le bruit intrinsèque du récepteur. Voir sa description au § 3.1.1.2.

3.1.2.5 Champ minimal utilisable

Pour que la qualité d'un service audionumérique DRM soit suffisante, un taux d'erreur sur les bits (TEB) d'environ 10^{-4} est nécessaire. Pour cela, le rapport *S/N* requis à l'entrée du récepteur dépend non seulement des paramètres du système, mais aussi des conditions de propagation des ondes dans les différentes bandes de fréquences.

Le tableau ci-dessous fournit des intervalles de valeurs pertinentes du champ minimal utilisable. Ces intervalles couvrent les différents systèmes de modulation et niveaux de protection possibles. Seul un petit nombre de combinaisons est indiqué, mais il est suffisant pour se faire une idée du large éventail de valeurs qui en découlent.

Mode de fiabilité	LF	MF	HF
Mode de fiabilité A (propagation par l'onde de sol)	39,1-49,7	33,1-43,7	
Mode de fiabilité A (propagation par l'onde de sol et par l'onde ionosphérique)		33,9-47,4	
Mode de fiabilité B (propagation par l'onde ionosphérique)	–		19,1-30,4

Valeurs des paramètres de planification pour le système DRM au-dessous de 30 MHz

Bande	LF		MF		HF	
Largeur de bande (kHz)	4,5 kHz	9 kHz	4,5 ou 5 kHz	9 ou 10 kHz	5 kHz	10 kHz
S/N requis (dB)[(1)]	8,8-22,9	8,6-22,0	8,8-31,2	8,6-30,9	9,5-31,2	9,3-35,5
Bruit intrinsèque du récepteur (dB(μV/m))	27,5	30,5	21,5	24,5	1,5	4,5
Champ minimal utilisable (dB(μV/m))[(1)]	39,3-49,7	39,1-49,2	33,3-47,4	33,1-46,5	19,2-30,4	19,1-29,9

(1) Les valeurs dépendent du système de modulation (MAQ-16 ou MAQ-64), du taux de codage (0,5-0,78) et des modèles des canaux de propagation (par l'onde de sol et/ou par l'onde ionosphérique).

3.1.2.6 Rapports signal/bruit requis pour la réception de signaux DRM

Le tableau suivant indique les rapports signal/bruit (SNR) requis pour obtenir un TEB d'environ 10^{-4} dans des conditions de propagation types dans les bandes de fréquences considérées.

	LF	MF	HF
Propagation par l'onde de sol (largeurs de bande 9 kHz et 10 kHz)	8,6-21,4	8,6-21,4	
Mode de fiabilité A, B (largeurs de bande 4,5 kHz et 5 kHz) (propagation par l'onde de sol)	8,8-19,5	8,8-19,5	
Mode de fiabilité B (propagation par l'onde de sol et par l'onde ionosphérique)	–	9,4-22,8	14,6-30,9
Mode de fiabilité C (propagation par l'onde de sol et par l'onde ionosphérique)	–	–	14,6-33,3
Mode de fiabilité D (propagation par l'onde ionosphérique)	–	–	16,0-35,0

3.1.2.6.1 Rapports de protection (RP)

Les combinaisons des types d'occupation spectrale et des modes de fiabilité conduisent à plusieurs spectres RF de l'émetteur, d'où des brouillages différents et donc la nécessité de prévoir des rapports de protection RF adaptés à chaque combinaison. Les rapports de protection requis pour les

différents modes de fiabilité DRM étant relativement proches, ils sont présentés, dans les tableaux qui suivent, pour le seul mode de fiabilité B.

3.1.2.6.2 Rapports de protection dans le même canal

Signal utile	Signal brouilleur	Intervalle des RP dans le même canal
AM	DRM	23,0-23,6
DRM	AM	4,8-7,8
DRM	DRM	12,8-16,4

3.1.2.6.3 Rapports de protection du canal adjacent

Les valeurs des rapports de protection du canal adjacent couvrent des espacements de fréquences compris entre –20 kHz to +20 kHz. Elles ne sont pas reproduites ici.

3.1.3 Gammes de fréquences de la radiodiffusion en ondes kilométriques (LF), hectométriques (MF), décamétriques (HF) et métriques (VHF)

Dans l'article 5 du RR, les bandes de fréquences inférieures à 80 MHz attribuées à la radiodiffusion sont les suivantes:

Bande	Fréquences
LF	148,5-283,5 kHz (Région 1)
MF	526,5-1 605,5 kHz (Régions 1, 3)
	525-1 705 kHz (Région 2)
HF	3 950-4 000 kHz (Régions 1, 3)
	5 900-6 200 kHz
	7 100-7 350 kHz WRC-03: 7 200-7 350 (03-2007) et –7 400 (03-2009)
	9 400-9 900 kHz
	11 600-12 100 kHz
	13 570-13 870 kHz
	15 100-15 800 kHz
	17 480-17 900 kHz
	18 900-19 020 kHz
	21 450-21 850 kHz
	25 670-26 100 kHz
VHF	47-68 MHz (Région 1)
	54-72 MHz (Région 2)
	47-50 MHz, 54-68 MHz (Région 3)
	76-108 MHz (Région 2)

Bande	Fréquences
Bandes dans les zones tropicales (utilisées pour la diffusion nationale dans les pays des zones tropicales):	
	2 300-2 498 kHz (Région 1, Tropical)
	2 300-2 495 kHz (Régions 2+3)
	3 200-3 400 kHz (toutes Régions)
	4 750-4 995 kHz
	5 005-5 060 kHz

3.1.4 Critères de protection et brouillages acceptables

Le Règlement des radiocommunications, diverses Recommandations de l'UIT-R et plusieurs Rapports fournissent des spécifications et des informations utiles qui permettent de définir les critères de protection requis pour une réception de radiodiffusion fiable. La présente section synthétise les informations pertinentes et se propose d'en déduire les critères de protection pour la radiodiffusion sonore analogique en ondes décamétriques (HF). Etant donné que la plupart des modems CPL utilisent la MROF et l'étalement de spectre (ES) comme méthode de modulation, les brouillages causés par les CPL sont considérés comme un bruit aléatoire dans l'analyse qui suit.

3.1.4.1 Recommandations UIT-R BS.1786 et UIT-R BT.1786 – Critères d'évaluation de l'incidence des brouillages causés au service de radiodiffusion de Terre

Description	Limite admissible pour le brouillage total causé au service de radiodiffusion par des dispositifs et des systèmes ne disposant pas d'attribution de fréquences dans le Règlement des radiocommunications
Valeur calculée	Ne doit à aucun moment dépasser 1% de la puissance totale de bruit du système de réception

3.1.4.2 Recommandation UIT-R BS.560-4 – Rapports de protection en radiofréquence pour la radiodiffusion en ondes kilométriques, hectométriques et décamétriques

Description	Champ minimal utilisable: 34 dB plus la plus grande des deux valeurs suivantes: 3,5 dB(μV/m) (bruit intrinsèque du récepteur) et bruit atmosphérique
Valeur calculée	*C/N*: 34 dB Champ minimal utilisable ≥ 37,5 dB(μV/m)

3.1.4.3 Recommandation UIT-R BS.703 – Caractéristiques de récepteurs de référence de radiodiffusion sonore à modulation d'amplitude à des fins de planification

Description	Sensibilité limitée par le bruit: 40 dBμV/m, déterminée à partir du rapport signal/bruit non pondéré en audiofréquence de 26 dB, se rapportant à une modulation de 30%.
Valeur calculée	*C/N*: 26 dB – 20 log(0,3) dB = 26 + 10,5 = 36,5 dB Intensité du champ: 40 dB(μV/m)

3.1.4.4 Rapport UIT-R BS.1058 – Rapport signal/bruit AF et RF minimal nécessaire pour la radiodiffusion en bande 7 (B.dam)

Description	Rapport signal/bruit AF à des fins de planification: 24 dB
	Rapport signal/bruit AF correspondant à la note 4 sur l'échelle de l'UIT-R (perceptible, mais pas gênant): 31 dB
	Rapport signal/bruit AF correspondant à la note 3 sur l'échelle de l'UIT-R (légèrement gênant): 20-21 dB
Valeur calculée	C/N: 24 dB – 20 log(0,3) dB = 24 + 10,5 = 34,5 dB

3.1.4.5 Annexe 2 de la Recommandation UIT-R BS.1615 – Paramètres de planification pour la radiodiffusion sonore numérique aux fréquences inférieures à 30 MHz – Rapports de protection RF pour la DSB (système DRM) aux fréquences inférieures à 30 MHz

Description	Rapport de protection RF relatif dans le cas d'un signal MA brouillé par un signal numérique: 6 à 6,6 dB pour un rapport de protection AF de 0 dB pris comme valeur de référence
Valeur calculée	C/N: 6 dB + 17 dB = 23 dB, pour un rapport de protection AF de 17 dB[(1)]

(1) La valeur 17 dB est prise comme exemple afin de calculer le rapport C/N en valeurs absolues.

3.1.4.6 Calcul de l'intervalle admissible de l'intensité de champ produite par les systèmes de télécommunication câblés

Résumé de la valeur calculée	Champ minimal utilisable de radiodiffusion en ondes décamétriques: de 37,5 à 40 dB(μV/m) C/N: de 30 à 36,5 dB
Intensité de champ calculée	Intervalle de l'intensité du champ produite par les systèmes câblés: de 1 à 10 dB(μV/m)

3.1.4.7 Niveau de bruit du récepteur et niveau de brouillage admissible

Pour évaluer la dégradation de la sensibilité du récepteur causée par les brouillages dans le même canal ou pour évaluer un niveau de brouillage admissible dans le même canal, il est préférable de connaître le niveau de bruit du récepteur plutôt que sa sensibilité. En effet, la sensibilité du récepteur se dégrade sous l'effet de l'augmentation du bruit du récepteur, augmentation causée par la puissance de brouillage dans le même canal. Par exemple, si la puissance de brouillage dans le même canal en réception est égale au bruit d'origine du récepteur, la puissance de bruit résultante augmente d'un facteur 2 (3 dB) (en négligeant la différence des ondes de bruit) et la dégradation de la sensibilité est égale à 3 dB.

Le niveau de bruit extérieur et le niveau de brouillage du récepteur sont généralement exprimés en termes d'intensité de champ. En conséquence, il est pratique d'exprimer le bruit interne du récepteur par l'intensité du champ équivalent afin de faciliter les comparaisons (on a substitué au bruit réel existant dans le récepteur un bruit équivalent reçu par l'antenne d'un récepteur sans bruit).

Le niveau de bruit du récepteur peut se calculer comme indiqué au § 3.1.1.2. Bien que ce bruit soit évalué en considérant la sensibilité d'un récepteur analogique, les résultats s'appliquent également aux récepteurs numériques à condition de prendre en compte les différences en termes de largeur de bande.

L'évaluation du bruit du récepteur effectuée ci-dessus part du principe qu'il n'y a pas de bruit extérieur. Cela étant, outre le bruit (intrinsèque) interne du récepteur (qui est produit dans le récepteur lui-même), le bruit du récepteur comprend généralement un bruit extérieur, qui est reçu via les antennes. Dans le cas des récepteurs fonctionnant à des fréquences inférieures à 30 MHz, ce bruit extérieur est composé du bruit atmosphérique, du bruit artificiel et du bruit cosmique.

La Recommandation UIT-R P.372-9 fournit l'expression de la puissance moyenne du bruit atmosphérique, du bruit artificiel et du bruit cosmique par rapport au niveau du bruit thermique kT_0b lorsque ces bruits sont reçus via une courte antenne unipolaire verticale sans perte placée au-dessus d'un sol parfaitement plan. Il est donc commode de convertir le niveau de bruit interne du récepteur en une intensité de champ équivalente (*Eri)*, comme indiqué ci-dessus, déterminée à partir d'une antenne identique.

L'intensité de champ équivalente du bruit (total) du récepteur (*Ert*) est obtenue en additionnant les puissances de l'*Eri* et du champ moyen du bruit extérieur (*Ere*). Ce qui donne:

$$Ert^2 = Eri^2 + Ere^2 \qquad (3\text{-}1)$$

Lorsque l'intensité du champ des brouillages dans le même canal, *Eu*, se superpose à *Ert*, l'intensité de champ équivalente de la puissance de bruit du récepteur atteint une valeur *Ertu*, qui correspond à la somme des puissances de *Ert* et *Eu.* Soit:

$$Ertu^2 = Ert^2 + Eu^2 \qquad (3\text{-}2)$$

Exemple:

– Lorsque *Eu* est égal à *Ert*, le bruit total du récepteur augmente de 3 dB, autrement dit la sensibilité du récepteur se dégrade de 3 dB.
– Lorsque *Eu* est inférieur à *Ert* de 6 dB, la sensibilité du récepteur se dégrade de 1 dB.
– Lorsque *Eu* est inférieur à *Ert* de 10 dB, la sensibilité du récepteur se dégrade de 0,5 dB.
– Lorsque *Eu* est inférieur à *Ert* de 20 dB, la sensibilité du récepteur se dégrade de 0,05 dB.

Par conséquent, pour limiter la dégradation de la sensibilité du récepteur causée par les brouillages dans le même canal (*Eu*) à 0,05 dB, *Eu* doit être inférieur de 20 dB à l'intensité de champ équivalente du bruit (total) du récepteur (*Ert*).

3.1.4.8 Intensité de champ équivalente du bruit du récepteur

Au § 3.1.1.2, le bruit interne du récepteur est calculé à partir de la sensibilité d'un récepteur à antenne incorporée. Or les chiffres de sensibilité indiqués dans ce paragraphe sont considérablement améliorés par l'utilisation d'une antenne externe, par exemple un fil court déployé dans la pièce. En tenant compte de cette amélioration et du faible niveau d'affaiblissement dans l'adaptation d'antenne des récepteurs en ondes métriques, on considère que le bruit extérieur, dont la valeur minimale est déterminée par le bruit artificiel, constitue la composante principale du bruit dans les récepteurs fonctionnant à des fréquences inférieures à 80 MHz.

Si l'on considère les caractéristiques d'antenne définies dans la Recommandation UIT-R P.372, à savoir une courte antenne verticale unipolaire sans perte placée au-dessus d'un sol parfaitement plan, la puissance reçue (P_r) produite par un champ *E* est donnée par:

$$P_r = E^2\lambda^2/(640\pi^2) \qquad (3\text{-}3)$$

où:

P_r : puissance reçue disponible maximale (W)

E : intensité du champ (V/m)

λ : longueur d'onde (m) = $3 \times 10^2/f$

f : fréquence (MHz).

En remplaçant kT_0b (–164,5 dBW) dans P_r ci-dessus, le champ équivalent du bruit thermique, $E(kT_0b)$ pour (b = 9 000 Hz), est donné par:

$$E(kT_0b) = 20 \log f - 56 \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \tag{3-4}$$

où:

$E(kT_0b)$: champ équivalent du bruit thermique kT_0b dB(µV/m)

k : constante de Boltzmann = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K

T_0 : température de référence = 288 K

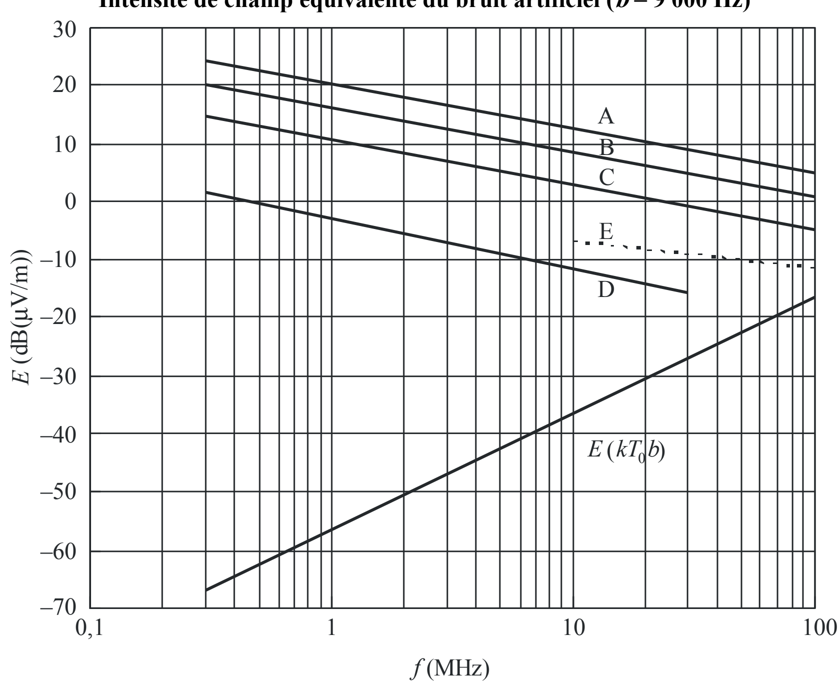
b : largeur de bande de bruit effective du récepteur (Hz)

kT_0b = –164,5 dBW (pour b = 9 000 Hz (la largeur de bande b doit être ajustée selon la largeur de bande nécessaire de l'émetteur)).

Les valeurs de $E(kT_0b)$ sont présentées à la Fig. 3-1. La Recommandation UIT-R P.372 fournit l'expression de la puissance moyenne de chaque type de bruit extérieur en la comparant avec le niveau de bruit thermique (F_{am} dB par rapport à kT_0). Autrement dit, chaque intensité de champ est exprimée en termes de F_{am} (dB) au-dessus de $E(kT_0b)$ dB(µV/m).

FIGURE 3-1

Intensité de champ équivalente du bruit artificiel (*b* = 9 000 Hz)



Catégories d'environnement:
Courbe A: Quartier d'affaires
Courbe B: Quartier résidentiel
Courbe C: Zone rurale
Courbe D: Zone rurale calme
Courbe E: Bruit cosmique

Report 2158-3-01

3.1.4.9 Bruit extérieur

La Recommandation UIT-R P.372 fournit l'expression de la puissance moyenne du bruit atmosphérique, du bruit artificiel et du bruit cosmique par rapport au niveau du bruit thermique (F_{am} dB par rapport à kT_0) lorsqu'ils sont reçus via une courte antenne unipolaire verticale sans perte placée au-dessus d'un sol parfaitement plan.

3.1.4.9.1 Bruit artificiel

La Fig. 3-1 présente une synthèse du bruit artificiel dans différents environnements. Les intensités de champ équivalentes correspondent à b = 9 000 Hz.

3.1.4.9.2 Comparaison entre le bruit artificiel et le bruit atmosphérique

Le niveau minimal de bruit extérieur est déterminé par le bruit artificiel étant donné que ce dernier est le facteur dominant lorsque le bruit atmosphérique diminue.

3.1.4.10 Niveau admissible de champ brouilleur

On peut conclure de ce qui précède que:

– S'il y a une antenne externe, le bruit du récepteur est principalement dû au bruit extérieur.

– Dans le cas d'une antenne incorporée, le bruit extérieur est le facteur prépondérant dans les quartiers d'affaires et les quartiers résidentiels. Même en zone rurale, le bruit extérieur est important.

– Etant donné que la valeur minimale du bruit extérieur est déterminée par le bruit artificiel, le niveau admissible de champ brouilleur est également déterminé par le bruit artificiel.

– Dans la présente analyse, on prend comme référence de bruit artificiel la courbe de la Fig. 3-1 correspondant aux zones rurales calmes.

3.1.4.11 Critères de protection pour le service de radiodiffusion

– Pour protéger le service de radiodiffusion d'une part du bruit émis par les systèmes CPL fonctionnant sur les câbles électriques et d'autre part des équipements électriques connectés aux prises de courant, le champ brouilleur ne doit pas être supérieur aux niveaux de protection situés entre les valeurs correspondant à la courbe F de la Fig. 3-2 (valeur efficace) et celles correspondant à la courbe G de cette même figure (valeurs de crête), et ce quel que soit l'emplacement du récepteur. Les valeurs de la Fig. 3-2 tiennent compte de la limite du bruit de fond du récepteur au-delà de 30 MHz.

– Les niveaux de protection nécessaires pour protéger un récepteur de radiodiffusion alimenté en courant alternatif contre les brouillages dus à son câble d'alimentation correspondent aux valeurs équivalentes données à la Fig. 3-1, y compris dans le cas où une antenne externe à long fil est utilisée ou lorsqu'une ligne électrique fait office d'antenne par mise à la terre de l'extrémité de l'antenne externe.

Les valeurs médianes de la puissance de bruit artificiel dans plusieurs environnements sont présentées à la Fig. 3-1. Cette figure contient également une courbe correspondant au bruit cosmique.

Dans tous les cas, les résultats sont compatibles avec une variation linéaire de la valeur médiane, F_{am}, avec la fréquence f de la forme:

$$F_{am} = c - d \log f \qquad \text{dB} \qquad (3\text{-}5)$$

Lorsque f est exprimée en MHz, c et d prennent les valeurs indiquées dans le Tableau 3-1. A noter que l'équation (3-5) est valable dans l'intervalle 0,3-250 MHz pour toutes les catégories d'environnement, à l'exception de celles correspondant aux courbes D et E de la Fig. 3-1.

Etant donné que les valeurs indiquées ci-dessus sont des valeurs reçues avec une courte antenne verticale unipolaire sans perte placée au-dessus d'un sol parfaitement plan, la composante verticale de l'intensité efficace de champ s'exprime sous la forme de F_{am} (dB) au-dessus de $E(kT_0b)$ (dB) donné par l'équation (3-4). Pour b = 9 000 Hz:

$$E_n = F_{am} + 20 \log f - 56 \qquad \text{dB(μV/m)} \qquad (3\text{-}6)$$

où:

E_n : intensité du champ dans la largeur de bande b

f : fréquence centrale (MHz)

b : largeur de bande de bruit effective du récepteur (Hz).

Les valeurs médianes du champ brouilleur artificiel dans plusieurs environnements obtenus à partir de l'équation (3-6) sont présentées à la Fig. 3-1.

En remplaçant dans l'équation (3-6) la valeur de F_{am} donnée par l'équation (3-5), on obtient:

$$E_n = c - d \log f + 20 \log f_{\text{MHz}} - 56 \qquad \text{dB(μV/m)} \qquad (3\text{-}7)$$

$$= c' + d' \log f \qquad \text{dB(μV/m)} \qquad (3\text{-}8)$$

où:

$c' = c - 56$

$d' = 20 - d$

c' et d' prennent les valeurs données dans le Tableau 3-1.

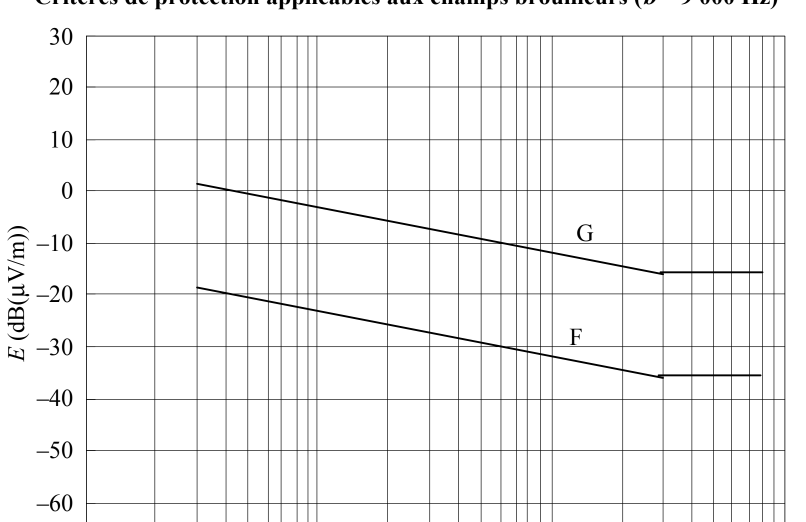
TABLEAU 3-1

Valeurs des constantes c' et d'

Catégorie d'environnement	c'	d'
Quartier d'affaires (courbe A)	20,8	–7,7
Quartier résidentiel (courbe B)	16,5	–7,7
Zone rurale (courbe C)	11,2	–7,7
Zone rurale calme (courbe D)	–2,4	–8,6
Bruit cosmique (courbe E)	–4	–3,0

FIGURE 3-2

Critères de protection applicables aux champs brouilleurs (*b* = 9 000 Hz)



Courbes F: Critères de protection pour une valeur efficace du champ brouilleur (20 dB au-dessous de la courbe D de la Fig. 3-1 pour les fréquences inférieures ou égales à 30 MHz)

G: Critères de protection pour une valeur de crête du champ brouilleur (identique à la courbe D de la Fig. 3-1 pour les fréquences inférieures ou égales à 30 MHz)

Pour les courbes F et G, *c'* et *d'* prennent les valeurs indiquées au Tableau 3-2.

TABLEAU 3-2

Valeurs des constantes *c'* et *d'* au-dessous de 30 MHz

Catégorie d'environnement	*c'*	*d'*
Courbe F	–22,4	–8,6
Courbe G	–2,4	–8,6

3.2 Service d'amateur et service d'amateur par satellite

3.2.1 Caractéristiques générales

Le RR définit le service radio amateur comme suit:

«**1.56** *service d'amateur*: *Service de radiocommunication* ayant pour objet l'instruction individuelle, l'intercommunication et les études techniques, effectué par des amateurs, c'est-à-dire par des personnes dûment autorisées, s'intéressant à la technique de la radioélectricité à titre uniquement personnel et sans intérêt pécuniaire.

1.57 *service d'amateur par satellite*: *Service de radiocommunication* faisant usage de *stations spatiales* situées sur des *satellites* de la Terre pour les mêmes fins que le *service d'amateur*.»

La puissance maximale autorisée en émission est comprise entre 100 W et 1,5 kW (puissance de sortie), selon les réglementations nationales. Les services d'amateur sont les seuls utilisateurs éventuels de puissance d'émission relativement élevée dans les quartiers résidentiels. Cela étant,

nombreux sont ceux qui choisissent d'utiliser des puissances d'émission faibles, de l'ordre de quelques watts. Il existe de nombreux types d'antenne et d'équipement, qui varient selon le lieu et les moyens financiers. On ne peut donc pas parler de station radio amateur «standard».

En règle générale, les utilisateurs des services d'amateur n'ont pas la possibilité d'éloigner leurs antennes des câbles électriques. Ils doivent en effet rester dans les limites de leur habitation, et donc généralement à proximité des câbles d'alimentation et des câbles téléphoniques. Ils peuvent réduire au minimum les brouillages causés par d'autres sources locales en renonçant à certains équipements, notamment les systèmes d'éclairage, les alimentations à découpage et tout autre dispositif produisant des brouillages en cours de fonctionnement. A noter que de nombreux dispositifs de transmission par câble n'offrent pas cette possibilité car ils émettent en permanence.

Les stations de services d'amateur communiquent sur de longues distances dans les bandes de fréquences décamétriques en utilisant de façon optimale les fenêtres de propagation. Pour assurer une communication efficace, ces stations fonctionnent souvent au voisinage du rapport signal/bruit minimal. C'est généralement l'intensité du signal reçu par rapport au bruit de fond qui fixe les limites de communication. Dans la pratique, les amateurs parviennent à communiquer avec un rapport signal/bruit de quelque 6 dB pour les communications vocales dans une largeur de bande nominale de 2,4 kHz et jusqu'à –6 dB (avec la même largeur de bande) pour le code morse ou des modes données à haute efficacité spectrale.

De nombreux amateurs utilisent leurs équipements de communication pour venir en aide en cas de catastrophe. Ainsi la radio amateur est-elle vue, dans de nombreux pays, comme un service de réserve de grande valeur en cas de panne ou de surcharge des systèmes de communication classiques. Les Etats utilisent donc cette possibilité en cas d'urgence. Les bandes de fréquences décamétriques et métriques applicables au service d'amateur sont attribuées dans cette optique.

3.2.1.1 Caractéristiques d'exploitation

Les stations d'amateur et les stations terriennes pour le service d'amateur par satellite n'ont généralement pas de fréquences assignées. Elles sélectionnent des fréquences de façon dynamique à l'aide de techniques LBT (écouter avant de parler) à l'intérieur d'une bande de fréquences qui leur a été attribuée. Les fréquences utilisées par les répéteurs de Terre, les stations de relais numériques et les satellites du service d'amateur par satellite sont choisies sur la base d'une coordination volontaire au sein des services d'amateur. Si certaines fréquences sont exclusivement attribuées pour le service d'amateur et le service d'amateur par satellite, nombreuses sont celles qui sont partagées avec d'autres services radioélectriques. Les amateurs sont conscients des restrictions qu'impose ce partage.

Les protocoles d'exploitation varient selon les exigences de communication et selon la propagation. Les bandes d'ondes hectométriques et décamétriques sont utilisées pour les ondes ionosphériques à incidence quasi verticale (NVIS) le long des trajets planétaires; les bandes d'ondes métriques, décimétriques et centimétriques pour les communications à courte portée. Le service d'amateur par satellite offre la possibilité d'utiliser des fréquences supérieures aux bandes d'ondes décamétriques pour les communications à grande distance.

3.2.2 Attribution de fréquences au service d'amateur

L'attribution des bandes de fréquences au service d'amateur dans la gamme 1,8-80 MHz varie selon la Région. Le Tableau 3-3 donne une bonne indication de la répartition fréquentielle de ces attributions.

3.2.3 Critères de protection applicables au service de radio amateur dans la bande d'ondes décamétriques

Les stations du service d'amateur fonctionnent souvent à des rapports signal/bruit (SNR) très faibles. Le SNR disponible est généralement limité par des facteurs liés à l'environnement, notamment le rendement des antennes, mais aussi le bruit artificiel extérieur, étant donné que la majorité des stations d'amateur se trouvent dans des zones résidentielles.

TABLEAU 3-3

Bandes de fréquences attribuées au service d'amateur dans la gamme 3-80 MHz

Fréquences approximatives (MHz)
1,8
3,5
7
10,1
14
18,1
21
24,9
28
50
70

3.2.3.1 Marge de protection contre les évanouissements et critère de protection de 0,5 dB du service de radio amateur dans la bande des fréquences décamétriques

Pour garantir un haut degré de disponibilité du signal, la radiodiffusion professionnelle se ménage de très grandes marges de protection contre les évanouissements, ce qui, combiné à la faible sensibilité des récepteurs, explique le fort niveau de puissance utilisé en radiodiffusion dans la bande des fréquences décamétriques. Dans le service radio d'amateur, les puissances d'émission autorisées sont relativement faibles et, dans les communications à grande distance, la marge de protection contre les évanouissements restante au-dessus de l'intensité de champ minimale requise pour un signal à grande distance est comprise entre 0 et 1 dB environ. Par conséquent, sur certaines liaisons de communication à grande distance, compte tenu de la forme de la courbe de puissance en fonction du temps d'un signal à bande étroite avec évanouissements dans la bande d'ondes décamétriques, certaines parties de la transmission sont perdues du fait des évanouissements, ce qui nécessite de répéter les émissions. Ainsi, une augmentation du bruit de fond ambiant de quelques décibels seulement a une incidence très dommageable sur la capacité d'une station d'amateur à communiquer sur de grandes distances.

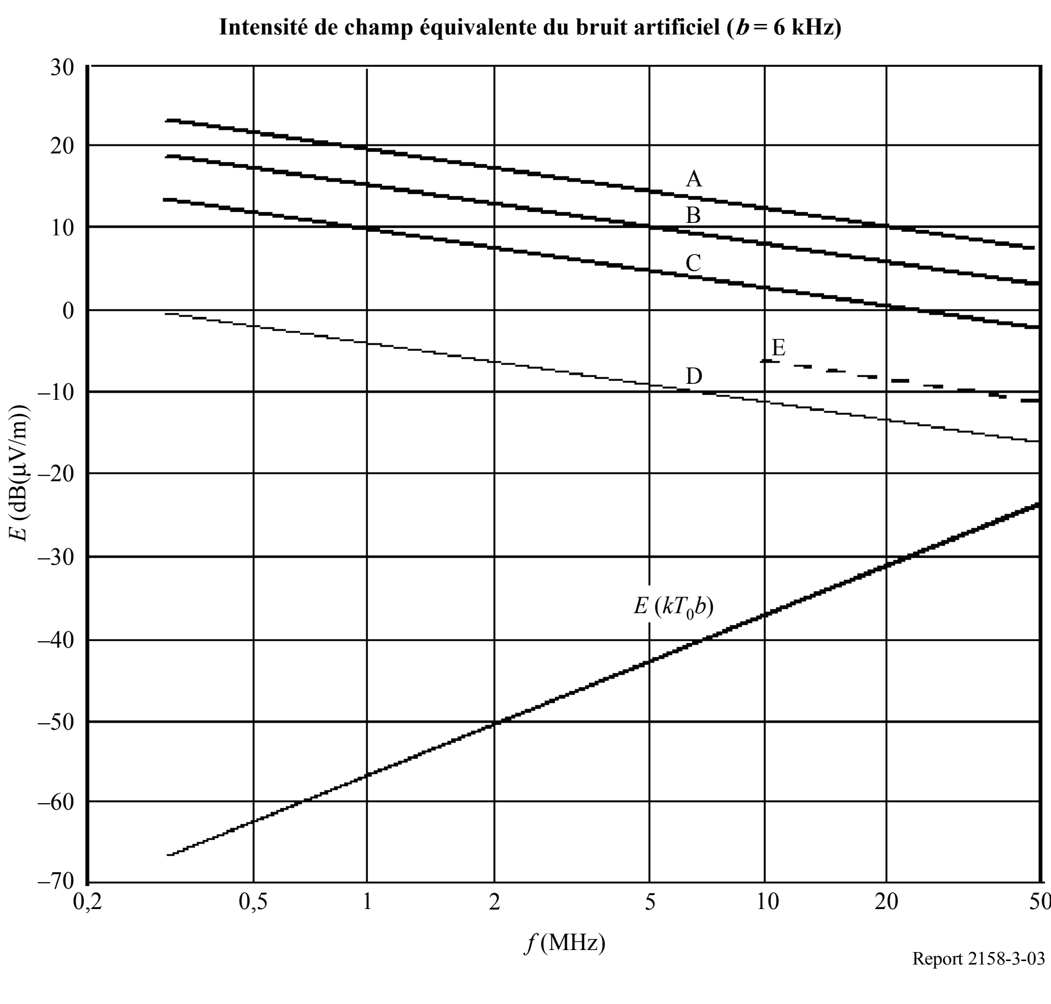
Pour cette raison, l'augmentation maximale admissible du bruit de fond total dû aux émissions CPL devrait être de 0,5 dB. Pour respecter cette condition, l'intensité moyenne du champ de bruit rayonné par le réseau électrique à une distance de 10 m doit être inférieure de 9,14 dB par rapport au niveau de bruit préexistant.

3.2.3.2 Bruit de fond dans les bandes de fréquences du service de radioamateur

A l'instar d'autres services exploitant la bande des fréquences décamétriques, la capacité du service d'amateur à communiquer de façon satisfaisante dépend du rapport entre le signal utile et le niveau de bruit. Le bruit est constitué de quatre composantes: bruit du récepteur (produit en interne), bruit atmosphérique, bruit artificiel et bruit cosmique. La Fig. 3-3 est tirée de la Recommandation UIT-R P.372. Elle a été obtenue à partir d'un graphique représentant les valeurs dépassées pendant 99,5% du temps. La largeur de bande utilisée pour les mesures est de 6 kHz et *f* représente la fréquence (MHz).

FIGURE 3-3

Intensité de champ équivalente du bruit artificiel (*b* = 6 kHz)



Signification des courbes:

Courbe A: Quartier d'affaires
Courbe B: Quartier résidentiel
Courbe C: Zone rurale
Courbe D: Zone rurale calme
Courbe E: Bruit cosmique

3.2.3.3 Niveaux de bruit de fond admissibles

D'après les critères énoncés au § 3.2.3.1, l'augmentation de bruit de fond admissible produit par les CPL est de 0,5 dB par rapport aux valeurs tirées du graphique de la Fig. 3-3. A noter que cette exigence est indépendante de la largeur de bande du signal reçu: s'agissant de la largeur de bande de mesure habituelle de 9 kHz, les chiffres peuvent être augmentés de 1,8 dB. Le Tableau 3-4 récapitule les intensités de champ admissibles, à une distance de 10 m, que doit respecter une installation CPL. Les chiffres pour 70 MHz sont obtenus par extrapolation de la Fig. 3-3.

TABLEAU 3-4

Critères globaux de protection sur la base d'un critère de 0,5 dB – intensité de champ maximale à une distance de 10 m d'une installation CPL

Bande de fréquences (MHz)	dB(μV/m) dans 6 kHz			
	Quartier d'affaires	Quartier résidentiel	Zone rurale	Zone rurale calme
1,8	18,5	13,5	8,5	–7,5
3,5	16,5	12,5	5,5	–8,5
7	14,5	9,5	4,5	–9,5
10	12,5	8,5	3,5	–5,5
14	11,5	7,5	2,5	–6,5
18	11	7	2	–7
21	10	6	0,5	–8,5
24	9,5	5,5	0	–9
28	9	5	–0,5	–9,5
50	8,5	4,5	–1,5	–10
70	8	4	–2	–10,5

3.3 Service mobile aéronautique et service de radionavigation aéronautique

Pour évaluer la compatibilité, il est nécessaire de disposer au minimum des caractéristiques suivantes des services radio brouillés:

– type de service;
– gamme de fréquences utilisée;
– intensité de champ minimale désirée;
– distances horizontale et verticale de la zone de couverture opérationnelle désignée.

S'agissant des services radio aéronautiques susceptibles d'être brouillés par des rayonnements de fuite provenant de la télévision par câble dans la gamme des fréquences supérieures à 30 MHz, ces caractéristiques figurent au Tableau 3-5.

De nombreuses radios militaires à ondes décamétriques sont situées sur des plates-formes aéroportées. Elles peuvent donc être brouillées en raison de l'affaiblissement de propagation peu important des signaux brouilleurs et de la grande distance de l'horizon radioélectrique des radios aéroportées.

La radio en ondes décamétriques est utilisée dans le secteur aérospatial comme moyen de communication principal au-delà de la visibilité directe avec les plates-formes mobiles aéroportées, de Terre et maritimes. Les informations sont échangées par ondes radio décamétriques aux formats voix, message et liaison de données.

Les communications par ondes décamétriques sont utilisées entre les éléments au sol chargés du commandement et du contrôle aériens et les aéronefs afin d'échanger, sur de grandes distances, des données concernant le contrôle des missions, des informations de surveillance ainsi que des données fournies par des capteurs, ou lorsque d'autres moyens de communication sont indisponibles du fait d'une panne d'équipement ou de brouillages. Les ondes décamétriques sont également utilisées pour

le contrôle de la circulation aérienne (ATC) lorsque la portée des équipements fonctionnant dans les bandes de fréquences métriques est insuffisante.

TABLEAU 3-5

Caractéristiques des systèmes aéronautiques et des systèmes de radionavigation

Bande de fréquences	Abréviation de l'application	Type de service, brève description	Zone de couverture opérationnelle désignée	Risque de brouillage	Largeur de bande en réception (kHz)	Champ minimal utile (dB(µV/m))
90-110 kHz	LORAN C			ADSL		
255-526,5 kHz	NDB	Radiophare omnidirectionnel		ADSL		
2,8-22 MHz	Communications en ondes décamétriques	Communications en ondes décamétriques		CPL, ADSL, CATV		
3 023 kHz	Détresse/urgence			CPL, ADSL		
5 680 kHz	Détresse/urgence			CPL, ADSL, CATV		
74,8-75,2 MHz	ILS/radiophare marqueur	Les radiophares marqueurs du service de radionavigation aéronautique appartenant au système ILS fournissent au pilote ou au système de gestion de vol (FMS) un signal lorsque l'avion passe en certains points déterminés, lors des phases d'approche finale et d'atterrissage	**Horizontal**: cercle de 100 m de rayon environ dont le centre est le radiophare **Vertical**: de 3 m à 1 km selon la position du radiophare. Position du radiophare: 2 ou 3 points situés dans le prolongement de l'axe de la piste, entre 100 m et 7,5 km du seuil de piste	CATV		63

Les communications par ondes décamétriques sont utilisées entre des éléments chargés du commandement et du contrôle aériens et des dispositifs au sol, principalement en mode dégradé lorsque les équipements principaux et de capacité supérieure sont indisponibles.

Exemples:

– backup des systèmes de communications gouvernementaux;
– liaisons avec le programme Partenariat pour la paix (PPP) et avec des éléments non gouvernementaux;
– liaisons avec des entités déployées/mobiles;
– liaisons avec des formations tactiques.

S'agissant des caractéristiques systèmes et des critères de protection requis pour les services mobiles maritimes et aéronautiques, il n'existe pas de document unique qui regrouperait les informations concernant les systèmes fonctionnant à des fréquences inférieures à 80 MHz. Un état des lieux des

documents existants révèle que quelques données concernant ces caractéristiques figurent dans les Recommandations suivantes: UIT-R M.257, UIT-R M.488, UIT-R M.541, UIT-R M.627, UIT-R M.688, UIT-R M.822, UIT-R M.1081, UIT-R M.1082, UIT-R M.1173 et UIT-R M.1458, ainsi que dans certaines dispositions du RR.

En outre, il n'existe pas de Recommandations officielles applicables à la protection des systèmes mobiles maritimes ou aéronautiques.

L'Annexe 2.6 contient une analyse de compatibilité qui évalue les brouillages que pourraient causer les effets cumulatifs des sources CPL aux récepteurs aéroportés.

3.3.1 Résultats

Le tableau ci-après a été établi selon une méthode analogue à celle présentée dans le Rapport UIT-R SM.2057, la limite imposée par l'emploi de technologies multiples ayant été portée de 6 dB à 20 dB, pour tenir compte du fait que le système CPL n'est pas un élément rayonnant intentionnel, de sorte que de l'avis du Groupe de travail 5B, il ne devrait admettre qu'une marge de brouillage de 1%.

TABLEAU 3-6

Niveau du signal à protéger au niveau de l'antenne de réception

Système	**Bande de fréquences**	**Emplacement du récepteur**	**Niveau minimal du signal utile**		**Rapport signal utile/signal brouilleur nécessaire (Note 1)**	**Largeur de bande du récepteur**	**Marge pour la sécurité aérienne**	**Limite imposée par l'emploi de techniques multiples**	**Niveau du signal à protéger à l'entrée de l'antenne**
			(µV/m)	**(dBm)**	**(dB)**	**(kHz)**	**(dB)**	**(dB)**	**(dBm/Hz)**
Radiophare non directionnel (NDB)	190-535 kHz	Aéroporté	70	−31	15	2,8	6	20	−107
Communications en ondes décamétriques	2,85-22 MHz	Aéroporté			15	3	6	20	
		Au sol			15	3	6	20	
Radiophare marqueur	74,8-75,2 MHz	Aéroporté	1 500	−51	20	22	6	20	−143

NOTE 1 – Les valeurs indiquées dans ce tableau sont le rapport signal utile/signal brouilleur intrasystème ou, dans le cas du radar, le rapport brouillage/bruit du système et sont fournies à titre provisoire.

3.4 Observations générales portant sur les critères de protection du service fixe et du service mobile de Terre fonctionnant dans la bande d'ondes décamétriques

La présente section examine les critères de protection nécessaires pour garantir que les services de radiocommunications fixes et mobiles de Terre fonctionnant dans la bande des fréquences décamétriques, en particulier ceux utilisés par la radionavigation et d'autres applications de sécurité, ne subissent pas de brouillages préjudiciables provenant d'installations ou de réseaux CPL, ainsi que l'exige le numéro 15.12 du RR.

Les forces terrestres ont besoin de communiquer par ondes décamétriques afin de garantir une consultation, un commandement et un contrôle efficaces, au sein de l'OTAN et avec les pays membres du PPP. En outre, les communications radio de réseau de combat par ondes décamétriques sont utilisées aux échelons inférieurs comme moyens de communication primaires ou secondaires lorsque les conditions de terrain, de distance ou de mobilité ne permettent pas de recourir aux systèmes de télécommunications tactiques de zone.

Le service mobile terrestre est très largement utilisé à plusieurs titres: défense nationale, maintien de l'ordre; gestion et préservation des ressources nationales; recherche et sauvetage; opérations de communication au niveau national en cas d'urgence et à des fins de sécurité sur les rivages maritimes, dans les lacs, dans les forêts et dans les réserves naturelles, et pour protéger les ressources en eau. Ces communications radio sont utilisées notamment dans les zones urbaines, suburbaines et rurales, sur terre comme sur mer. Les équipements mobiles de Terre sont généralement exploités à proximité de lignes électriques, lesquelles peuvent servir à transmettre des signaux CPL.

3.4.1 Critères de protection et besoins de protection

3.4.1.1 Critères de protection

Les critères de protection des communications utilisant la bande d'ondes décamétriques contre les brouillages sont déterminés à partir des niveaux de bruit thermique, artificiel, cosmique et atmosphérique définis à l'Annexe 1 du présent Rapport.

Dégradation de sensibilité de 0,5 dB

De façon générale, le critère de brouillage admissible est déterminé à partir d'une dégradation maximale de la sensibilité de 0,5 dB. La quantité totale de bruit et de brouillages (produits par les CPL) ne doit donc pas dépasser de plus de 0,5 dB le bruit total présent au niveau du récepteur d'ondes décamétriques en l'absence de brouillages provenant des CPL.

Autrement dit:

$$(\text{Total } I \text{ et } N) \text{ (dBm/Hz)} < N \text{ (dBm/Hz)} + 0{,}5$$

où:

I: brouillages produits par les CPL (dBm) dans une largeur de bande de 1 Hz

N: quantité totale de bruit du récepteur et de bruit artificiel (dBm) dans une largeur de bande de 1 Hz.

Le critère de dégradation de la sensibilité de 0,5 dB choisi ci-dessus repose sur le fait que les systèmes radio militaires fonctionnent au voisinage de leur niveau de sensibilité.

Paramètres fondamentaux des systèmes radio en ondes décamétriques requis pour les calculs

Pour étudier les systèmes radio en ondes décamétriques soumis à des brouillages, il est nécessaire de connaître les paramètres suivants:

– facteur de bruit du récepteur: 10 dB;

– gain d'antenne de réception: 0 dBi[11];

– bruit thermique: –174 dBm/Hz.

L'approche adoptée ici ne requiert **pas** d'autres paramètres concernant les systèmes radio en ondes décamétriques.

3.4.1.2 Besoins de protection

Les besoins de protection des systèmes radio en ondes décamétriques déterminés à partir des critères de protection définis ci-dessus sont les suivants:

a) l'augmentation du bruit de fond et des brouillages, par Hz, causés par des rayonnements non désirées des réseaux de transmission par câble, y compris ceux des systèmes CPL, ne doit pas dépasser 0,5 dB;

b) on peut prendre comme niveau de bruit de référence, selon le cas, le bruit caractéristique des zones rurales calmes, des zones rurales, des quartiers résidentiels ou des quartiers d'affaires;

c) par hypothèse, on considère que l'espace entre un câble et le récepteur HF brouillé est de 10 m.

3.4.2 Un critère de protection possible

Etant donné qu'ils utilisent une énergie radiofréquence sur des lignes de transmission non blindées et dissymétriques, les systèmes CPL émettent inévitablement des rayonnements RF. Ces rayonnements peuvent causer des brouillages préjudiciables aux communications radioélectriques. Pour protéger les services fixes existants assujettis à licence dans la bande des fréquences décamétriques, il est donc nécessaire de limiter les émissions par rayonnement.

Les systèmes CPL n'étant pas reconnus comme une classe d'émission ni comme un service, ils doivent être considérés comme une source de rayonnements étrangère.

Il est proposé que le critère de protection du service fixe fonctionnant dans la bande des fréquences décamétriques contre les systèmes CPL soit provisoirement fixé à un objectif de 1% de dégradation de la qualité de fonctionnement causée par des rayonnements non désirés par rapport aux valeurs moyennes spécifiées dans la Recommandation UIT-R F.1094 développée par l'ex-GT/9A. Il convient à cet égard de prendre en compte la valeur de crête des émissions CPL.

Il faut également tenir compte de la quantité de brouillages cumulatifs au niveau de l'antenne de réception par rapport au niveau de bruit d'une zone rurale calme tel que spécifié dans la Recommandation UIT-R P.372. Certaines techniques, notamment des procédures de mise en œuvre des systèmes CPL, sont susceptibles d'atténuer les problèmes éventuels de compatibilité qui découlent du respect de ces objectifs.

---

[11] Le gain d'antenne des systèmes fonctionnant dans les bandes d'ondes décamétriques est normalement d'environ 0 dBi. Un gain d'antenne positif diminue l'influence relative du bruit thermique.

3.4.3 Systèmes automatiques d'établissement de liaisons

L'expérience des missions militaires en témoigne, les communications en ondes décamétriques sont parfois le seul moyen de diffuser – sans tarder et sans risque de brouillage intentionnel des signaux – des informations sur les missions et des rapports d'avancement. A noter par ailleurs qu'en cas d'explosion nucléaire, les liaisons SATCOM seraient perturbées, alors que les liaisons HF resteraient opérationnelles, si ce n'est quelques perturbations de courte durée.

En règle générale, on utilise des systèmes radio adaptatifs, qui ont la particularité de choisir automatiquement les meilleures fréquences correspondant aux meilleures conditions de propagation et au débit binaire maximal, mais uniquement si *le bruit de fond est suffisamment faible* (c'est-à-dire au-dessous du seuil de décision de ces systèmes). Des niveaux de bruit supérieurs diminuent en effet la qualité de fonctionnement des systèmes reposant sur l'établissement automatique de liaison (ALE) ainsi que la qualité de fonctionnement générale des systèmes radio numériques.

3.5 Systèmes mobiles maritimes

Le présent chapitre passe en revue les différentes bandes de fréquences attribuées au service mobile maritime et au service de télécommunications maritimes.

3.5.1 Considérations générales

Les radiocommunications maritimes, au premier rang desquelles figurent les appels de détresse et les communications ayant trait à la sécurité, reposent largement sur l'utilisation des bandes d'ondes hectométriques et décamétriques, principalement du fait de leurs conditions particulières de propagation.

Le Règlement des radiocommunications de l'UIT définit les télécommunications maritimes comme un *service*. Les communications ont lieu entre des stations côtières et des navires ou entre plusieurs navires; les stations d'engin de sauvetage et les radiobalises d'urgence peuvent aussi contribuer à ce service. Sont également inclus le service des opérations portuaires et le service du mouvement des navires.

Le numéro 1.59 du RR définit le service de sécurité comme suit:

> «**1.59** *service de sécurité*: Tout *service de radiocommunication* exploité de façon permanente ou temporaire pour assurer la sécurité de la vie humaine et la sauvegarde des biens.»

Le secteur maritime utilise également la *radionavigation*, qui est aussi un service défini par le RR, avec des attributions de bandes de fréquences exclusives.

Les conditions d'utilisation des radiocommunications maritimes sont fixées par la Constitution et la Convention de l'UIT, complétées par les décisions des Conférences mondiales des radiocommunications (CMR), qui sont publiées sous la forme du Règlement des radiocommunications (RR). Le RR contient également des dispositions qui contraignent toutes les administrations à prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger ces radiofréquences contre les brouillages préjudiciables.

3.5.2 Fréquences attribuées aux télécommunications maritimes

Appels de détresse et communications ayant trait à la sécurité

L'Appendice 13 du RR définit les fréquences à utiliser pour les appels de détresse et les communications ayant trait à la sécurité non-SMDSM. Il était prévu que le système SMDSM remplacerait, partout dans le monde, l'Appendice 13 à partir du 1er février 1999, mais il a été tenu

compte du fait que certains pays et certains navires, qui ne relèvent pas de la Convention SOLAS, 1974, telle que modifiée, souhaitent parfois continuer d'utiliser les dispositions prévues à l'Appendice 13 pour les appels de détresse et les communications ayant trait à la sécurité, et ce pendant une certaine durée après le 1er février 1999.

Les paragraphes suivants indiquent en détail les réglementations qui régissent la protection des fréquences de détresse et de sécurité.

«Section II – Protection des fréquences de détresse et de sécurité

A. Généralités

§ 13 Sauf dans les cas prévus par le présent Règlement, toute émission pouvant causer des brouillages préjudiciables aux communications de détresse, d'alarme, d'urgence ou de sécurité sur les fréquences 500 kHz, 2 174,5 kHz, 2 182 kHz, 2 187,5 kHz, 4 125 kHz, 4 177,5 kHz, 4 207,5 kHz, 6 215 kHz, 6 268 kHz, 6 312 kHz, 8 291 kHz, 8 376,5 kHz, 8 414,5 kHz, 12 290 kHz, 12 520 kHz, 12 577 kHz, 16 420 kHz, 16 695 kHz, 16 804,5 kHz, 121,5 MHz, 156,525 MHz ou 156,8 MHz ou dans les bandes de fréquences 406-406,1 MHz, 1 544-1 545 MHz et 1 645,5-1 646,5 MHz (voir aussi l'Appendice **15**) est interdite. Toute émission causant des brouillages préjudiciables aux communications de détresse et de sécurité sur l'une quelconque des autres fréquences discrètes énumérées dans la Partie A2, Section I du présent Appendice et dans l'Appendice **15** est interdite.»

Système mondial de détresse et de sécurité en mer

Le Système mondial de détresse et de sécurité en mer (SMDSM) est entièrement défini dans la Convention internationale pour la sécurité de la vie humaine en mer (SOLAS, 1974). La Résolution 331 (Rév. CMR-97)* dispose que tous les navires régis par les dispositions de la Convention SOLAS de l'OMI doivent être équipés en vue du SMDSM avant le 1er février 1999.

Les fréquences à utiliser pour le SMDSM figurent à l'Appendice 15 du RR. Le Tableau 3-6 ci-dessous présente les attributions des fréquences de détresse et de sécurité. Outre les fréquences énumérées à l'Appendice 15, les stations côtières doivent utiliser d'autres fréquences appropriées pour transmettre des messages de sécurité.

* Cette Résolution a été ultérieurement révisée aux CMR-03 et CMR-07.

TABLEAU 3-7

Tableau des fréquences de détresse et de sécurité pour le service mobile maritime au-dessous de 30 MHz

	Détresse			Sécurité	
	DSC	RTP-COM	NBDP-COM	MSI/MSI-HF	AERO-SAR
	kHz	**kHz**	**kHz**	**kHz**	**kHz**
MF	**2 187,5**	**2 182,0**	**2 174,5**	**490,0**	**3 023,0**
				518,0	
HF	**4 207,5**	**4 125,0**	**4 177,5**	**4 209,5**	**5 680,0**
				4 210,0	
	6 312,0	**6 215,0**	**6 268,0**	**6 314,0**	
	8 414,5	**8 291,0**	**8 376,5**	**8 416,5**	
	12 577,0	**12 290,0**	**12 520,0**	**12 579,0**	
	16 804,5	**16 420,0**	**16 695,0**	**16 806,5**	
				19 680,5	
				22 376,0	
				26 100,5	
				MSI	
				MSI-HF	

Légende:

AERO-SAR Ces fréquences porteuses (fréquences de référence) aéronautiques peuvent être utilisées aux fins d'appels de détresse et de sécurité par les stations mobiles qui participent à des opérations coordonnées de recherche et de sauvetage.

DSC Ces fréquences sont utilisées exclusivement pour les appels de détresse et de sécurité émis au moyen de l'appel sélectif numérique conformément au numéro 32.5 (voir les numéros 33.8 et 33.32).

MSI Dans le service mobile maritime, ces fréquences sont utilisées exclusivement pour l'émission, par les stations côtières, d'informations sur la sécurité maritime (MSI) (y compris les avis et les informations urgentes relatifs à la météorologie et à la navigation) destinées aux navires, au moyen de la télégraphie à impression directe à bande étroite.

MSI-HF Dans le service mobile maritime, ces fréquences sont utilisées exclusivement pour l'émission, par les stations côtières, d'informations sur la sécurité en haute mer destinées aux navires, au moyen de la télégraphie à impression directe à bande étroite.

NBDP-COM Ces fréquences sont utilisées exclusivement pour les communications (le trafic) de détresse et de sécurité en télégraphie à impression directe à bande étroite.

RTP-COM Ces fréquences porteuses sont utilisées pour les communications (le trafic) de détresse et de sécurité en radiotéléphonie.

Fréquences attribuées au service mobile maritime

Le Tableau d'attribution des bandes de fréquences (Article 5 du RR) présenté au Tableau 3-7 contient les fréquences inférieures à 30 MHz attribuées exclusivement au service mobile maritime dans la Région 1. Ces fréquences doivent également être protégées des brouillages préjudiciables au sens du numéro 15.12 du RR.

TABLEAU 3-8

Fréquences attribuées au service mobile maritime

14-19,95 kHz		2 625-2 650 kHz	19 680-19 800 kHz
20,05-70 kHz	415-495 kHz 505-526,5 kHz	4 000-4 438 kHz	22 000-22 855 kHz
72-84 kHz	1 606,5-1 625 kHz	6 200-6 525 kHz	25 070-25 210 kHz
86-90 kHz	1 635-1 800 kHz	8 100-8 815 kHz	26 100-26 175 kHz
110-112 kHz		12 230-13 200 kHz	
117,6-126 kHz	2 045-2 160 kHz	16 360-17 410 kHz	
129-148,5 kHz	2 170-2 173,5 kHz 2 190,5-2 194 kHz	18 780-18 900 kHz	

3.5.3 Paramètres du récepteur pour le service mobile maritime dans les bandes de fréquences hectométriques et décamétriques

S'agissant des caractéristiques systèmes et des critères de protection requis pour les services mobiles maritimes et aéronautiques, il n'existe pas de document unique qui regrouperait les informations concernant les systèmes fonctionnant à des fréquences inférieures à 80 MHz. Un état des lieux des documents existants révèle que quelques données concernant ces caractéristiques figurent dans les Recommandations suivantes: UIT-R M.257, UIT-R M.488, UIT-R M.541, UIT-R M.627, UIT-R M.688, UIT-R M.822, UIT-R M.1081, UIT-R M.1082, UIT-R M.1173 et UIT-R M.1458, ainsi que dans certaines dispositions du RR.

En outre, il n'existe pas d'études techniques concernant les critères de protection ni de Recommandations officielles applicables à la protection des systèmes mobiles maritimes ou aéronautiques. Toutefois, on a rassemblé les renseignements suivants, qui pourront servir de base pour le calcul des critères de protection.

3.5.3.1 Récepteurs NAVTEX - 424,490 et 518 kHz

Le Rapport UIT-R M.910-1 fournit les valeurs suivantes:

– Sensibilité du récepteur = 18 μV/m (25 dB(μV/m));
– S/N = 8 dB (300 Hz);
– Rapport de protection cocanal = 8 dB.

3.5.3.2 Récepteurs dans les bandes d'ondes hectométriques et décamétriques

Les communications de détresse et de sécurité assurées dans les bandes d'ondes hectométriques et décamétriques dans le SMDSM utilisent les fréquences suivantes:

Appel sélectif numérique (ASN) (kHz)	Radiotéléphonie (R/T) (kHz)	Impression directe à bande étroite (IDBE) (kHz)
2 187,5	2 182	2 174,5
4 207,5	4 125	4 177,5
6 312	6 215	6 268
8 414,5	8 291	8 376,5
12 577	12 290	12 520
16 804,5	16 420	16 695

Informations relatives à la sécurité maritime (MSI) (kHz)	Coordination avec les aéronefs de recherche et de sauvetage (kHz)	Communications générales en ondes métriques/décamétriques dans le SMDSM utilisant les bandes de fréquences suivantes (kHz)
4 210 6 314 8 416,5 12 579 16 806,5 19 680,5 22 376 26 100,5	3 023 5 650	1 606,5-1 625 1 635-1 800 2 045-2 160 2 170-2 173,5 2 173,5-2 190,5 2 190,5-2 194 2 625-2 850 4 000-4 063 4 063-4 438 6 200-6 525 8 100-8 195 8 195-8 815 12 230-13 200 16 360-17 410 18 780-18 900 19 680-19 800 22 000-22 855 25 070-25 210 26 100-26 175

Rapports de protection cocanal:

– Radiotéléphonie = 9 dB

– Appel sélectif numérique = 12 dB

– Impression directe en bande étroite = 16 dB.

La norme 300 373 de l'ETSI contient les valeurs suivantes:

Sensibilité maximale utilisable:

Dans la bande 1 605-4 000 kHz: 5 dB(μV)

Dans la bande 4 000-27 500 kHz: 0 dB(μV)

Sélectivité vis-à-vis du signal adjacent:

–500 Hz +500 Hz: 40 dB (avec un filtre à bande étroite)

–1 kHz, +4 kHz: 40 dB

–2 kHz, +5 kHz: 50 dB

–5 kHz, +8 kHz: 60 dB

Constantes temporelles de commande automatique de gain:

Temps de réaction = de 5 à 10 ms

Temps de récupération = de 1 à 4 s

Transmodulation:

±20 kHz: niveau maximal de signal brouilleur = +90 dB(μV)

Intermodulation:

+70 dB(μV)

Rejet de réponse parasite:

70 dB

* Norme de l'ETSI 300 373.

3.5.4 Systèmes de radionavigation hyperboliques

En ce qui concerne l'utilisation dans les bandes 285,4-285,6 kHz, 285,6 et 315 kHz et 405 et 415 kHz (voir le numéro 466A du RR), la Recommandation UIT-RM.631-1 dispose ce qui suit:

– niveau minimal du signal utile reçu = 3 μV/m;
– largeur de bande ±10 Hz;
– rapport de protection cocanal = 20 dB.

Concernant l'utilisation de la bande 70-130 kHz (LORAN), la Recommandation UIT-R M.589-3 dispose ce qui suit:

– Le rapport *S/N* à la limite de la zone de couverture est en général de –10dB. Ainsi, si le niveau de bruit prévu est de 55 dB(μV/m), on aura besoin d'un niveau minimal du signal utile de 45 dB(μV/m) sur l'ensemble de la zone de couverture.
– Un rapport de protection type pour la valeur maximale du rapport signal brouilleur/signal utile est de 20 dB, ce qui signifie que le champ brouilleur au niveau du récepteur Loran-C devrait être inférieur à ~25 dB(μV/m) afin d'éviter les brouillages.

3.5.5 Radiophares du service de radionavigation maritime dans les bandes d'ondes kilométriques/hectométriques

Concernant l'utilisation dans la bande de fréquences 275-415 kHz, les Recommandations UIT-R M.823-3 et UIT-RM.588 disposent ce qui suit:

– Les assignations de fréquence aux radiophares maritimes sont faites en utilisant des multiples de 100 Hz.
– La largeur de bande occupée maximale en Région 1 est de 230 Hz.
– Le récepteur fonctionne avec une valeur maximale du taux d'erreur binaire égal à 1×10^{-3} en présence d'un bruit gaussien et avec un rapport signal/bruit de 7 dB dans la largeur de bande occupée.
– Le rapport de protection requis dans le cas d'un signal brouilleur sur le canal est de 15 dB.

3.6 Radiolocalisation

Le service de radiolocalisation est un service de radiorepérage utilisé pour la détection et la localisation dans l'espace d'objets distants (cibles).

Les fréquences de la gamme comprise entre 3 et 50 MHz sont utilisées pour divers usages, notamment la surveillance de zones des aéronefs et les mouvements de navire, la détection des missiles par alerte rapide et les observations océanographiques fournissant des données sur les hauteurs des vagues et le régime des vents.

3.6.1 Systèmes radars océanographiques dans les bandes 3-50 MHz

Les critères de protection applicables aux différents systèmes actuellement utilisés sont donnés dans le Tableau 3.8*bis*.

3.6.2 Caractéristiques des systèmes

Les caractéristiques des systèmes suivantes sont tirées du Rapport UIT-R M.1874.

TABLEAU 3-8*bis*

Critères de protection applicables aux systèmes radars océanographiques fonctionnant dans les bandes 3-50 MHz

Caractéristiques de réception	**Systèmes radars océanographiques (Recommandation UIT-R M.1874)**					
	1 (5 MHz) 2 (13 MHz) 3 (25 MHz) 4 (42 MHz)	**5 (8 MHz) 6 (12 MHz) 7 (16 MHz) 8 (25 MHz) 9 (42 MHz)**	**10 (9,2 MHz)**	**11 (24,5 MHz)**	**12 (24,5 MHz)**	**13 (41,9 MHz)**
Type de diagramme d'antenne	Doublets électriques et magnétiques	Directive avec ouverture du faisceau de ±3° à ±15°	Directive	Directive	Directive	Directive
Type d'antenne	2 antennes à cadres croisés et une antenne unipolaire regroupées dans un même système	Réseaux d'antennes unipolaires (de 4 à 16 antennes unipolaires)	16 ensembles Yagi à 2 éléments	8 ensembles Yagi à 3 éléments	8 ensembles Yagi à 3 éléments	8 ensembles Yagi à 3 éléments
Polarisation de l'antenne	Verticale	Verticale	Verticale	Verticale	Verticale	Verticale
Gain du faisceau principal de l'antenne	5 dBi	10 à 18 dBi	16 dBi	15 dBi	15 dBi	15 dBi
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation	45°	35°	30°	25°	25°	25°
Ouverture du faisceau d'antenne en azimut	90-360°	de 6 à 30° en fonction de la taille du réseau	8 à 10°	15°	15°	15°
Fréquence de balayage horizontal de l'antenne	Antenne fixe	Antenne fixe	Antenne fixe avec mise en forme numérique	Réseau d'antennes fixes à commande de phase 60 min par 12 directions	Antenne fixe avec mise en forme numérique	Antenne fixe avec mise en forme numérique
Hauteur de l'antenne	4 m	~¼λ	Point d'alimentation 10 m au-dessus du niveau du sol	Point d'alimentation 2 à 14 m au-dessus du niveau du sol	Point d'alimentation 2 à 14 m au-dessus du niveau du sol	Point d'alimentation 2 à 14 m au-dessus du niveau du sol
Largeur de bande à 3 dB du récepteur FI (Hz)	500 Hz	Pas de FI. La largeur de bande en bande de base est de 1 500 Hz	200 Hz	200 Hz	200 Hz	200 Hz
Facteur de bruit	12 dB avec impulsions	8 dB	17 dB avec impulsions	12 dB avec impulsions	12 dB avec impulsions	13 dB avec impulsions
Valeur tolérable maximale initiale des brouillages	−147 dBm	−142 dBm	−157 dBm	−162 dBm	−162 dBm	−161 dBm
Largeur de bande de résolution	500 Hz	1 500 Hz	1 Hz	1 Hz	1 Hz	1 Hz

NOTE 1 − La valeur tolérable maximale initiale des brouillages est indiquée pour le niveau total de brouillages représenté par toutes les sources de brouillage et il faudra en conséquence élaborer un facteur de répartition.

3.7 Service fixe

Il importe de signaler l'importance que revêtent les activités de renseignement d'origine électromagnétique (ROEM) pour les forces armées. Ces dernières sont amenées à écouter des signaux (très faibles), activité qui peut être perturbée par des brouillages de faible niveau.

Certaines stations radio militaires fonctionnant dans la bande des fréquences décamétriques sont alimentées par le réseau électrique public, lequel n'est pas nécessairement équipé pour filtrer les signaux correspondant à cette bande de fréquences. La suppression par filtrage des signaux CPL circulant sur les lignes électriques n'est d'ailleurs pas toujours facile à réaliser.

3.7.1 Caractéristiques des systèmes fixes

Un état des lieux des documents existants fait apparaître que certaines informations sur les caractéristiques des systèmes fixes figurent dans les Recommandations UIT-R F.758 et UIT-R F.764, dont certaines parties sont dépassées et doivent être révisées ou supprimées au cours du cycle d'étude actuel de l'UIT-R, ainsi que dans certaines dispositions du RR. En outre, la Recommandation UIT-R F.339 fournit des informations sur les largeurs de bande, les rapports signal/bruit et les marges de protection contre les évanouissements pour un ensemble complet de caractéristiques des systèmes fonctionnant dans la bande des fréquences décamétriques.

3.7.2 Critères de protection

Bien qu'il n'existe pas à ce jour d'étude technique concernant les critères de protection ni de Recommandation officielle relative à la protection des systèmes du service fixe fonctionnant dans la bandes des fréquences décamétriques, il est envisageable de prendre en compte l'intensité d'un signal brouilleur cumulatif au niveau de l'antenne de réception par rapport au niveau de bruit en zone rurale calme tel que défini par l'UIT et spécifié dans la Recommandation UIT-R P.372.

S'agissant de la méthodologie, on accorde généralement la préférence à une analyse de type déterministe pour étudier la protection du service fixe primaire dans la bande des fréquences décamétriques contre les brouillages causés par des applications de télécommunications à haut débit binaire utilisant les lignes d'alimentation électrique.

3.8 Radioastronomie

La Recommandation UIT-R RA.769 fournit les valeurs seuils de brouillages préjudiciables causés à l'exploitation du service de radioastronomie (SRA). Comme il est indiqué dans cette Recommandation, les valeurs représentent les niveaux seuils préjudiciables pour des observations types correspondant à un temps d'intégration (observations) de 2 000 s et un gain d'antenne de 0 dBi. La Recommandation UIT-R SA.509 fournit le diagramme de gain d'une antenne de radioastronomie.

Les bandes de fréquences attribuées au service de radioastronomie (SRA) à titre primaire sont 13,36-13,41 MHz et 25,55-25,67 MHz. En termes de puissance brouilleuse totale en entrée dans ces bandes, les niveaux seuils indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769 sont respectivement −185 dBW et −188 dBW, et les puissances surfaciques spectrales correspondantes à l'intérieur de ces bandes sont −248 et −249 dB(W/($m^2 \cdot$ Hz)).

Toutes les bandes de fréquences inférieures à 80 MHz actuellement attribuées au service de radioastronomie et utilisées de façon intensive par ce service sont indiquées au Tableau 3-8, qui fournit en outre les critères de protection pour les gammes de fréquences susceptibles d'être utilisées par les signaux distribués par câble. Ces informations sont celles figurant dans la Recommandation UIT-R RA.769.

La protection des bandes dans cette gamme de fréquences revêt une importance considérable pour la radioastronomie future en raison de la construction de radiotélescopes de nouvelle génération, notamment le MWA, le eVLA, le LOFAR (réseau basses fréquences) et le SKA (réseau d'un kilomètre carré).

TABLEAU 3-9

Bande de fréquences (MHz)	**Attribution commune en Europe (ECA): statut des attributions**	**Largeur de bande de référence pour les rayonnements non essentiels (MHz)**	**Niveau de brouillages préjudiciables (observations du continuum) (dB(μV/m))**	**Niveau de brouillages préjudiciables (observations des raies spectrales) (dB(μV/m))**
13,36-13,41	Partage à titre primaire (5.149)	0,05	–55,2	
25,55-25,67	A titre primaire (passive exclusive) (5.149)	0,12	–53,2	
	A titre secondaire (5.149)		–50,2	
37,5-38,25	A titre secondaire (5.149)		–50,2	
73,0-74,6		1,60		

NOTE 1 – Le numéro 5.149 du RR dispose que, pour les bandes de fréquences 13,36-13,41 MHz, 25,55-25,67 MHz, 37,5-38,25 MHz et 73,0-74,6 MHz, «[...] les administrations sont instamment priées de prendre toutes les mesures pratiquement réalisables pour protéger le service de radioastronomie contre les brouillages préjudiciables. Les émissions provenant de stations à bord d'engins spatiaux ou d'aéronefs peuvent constituer des sources de brouillage particulièrement importantes pour le service de radioastronomie».

3.9 Fréquences étalon et signaux horaires

D'après le groupe de travail 7A de l'UIT-R, il est possible que les analyses de brouillages ne prévoient pas avec précision les effets des éventuels brouillages provenant de systèmes CPL sur des services spécialisés, notamment la réception de fréquences étalon et de signaux horaires par des horloges radiocommandées.

Le Tableau 3-10 est tiré du tableau de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R SM.1138.

TABLEAU 3-10

Propriétés des fréquences étalon et signaux horaires

Description de l'émission	**Largeur de bande nécessaire**		**Désignation de l'émission**
	Formule	**Exemple de calcul**	
1 Haute fréquence (voix)			
Annonces parlées, double bande latérale	$B_n = 2M$	Parole M = 4 000 Largeur de bande: 8 000 Hz = 8 kHz	8K00A3XGN
2 Haute fréquence (salves de tonalité)			
Impulsions utilisées pour la mesure d'intervalles	$B_n = 2/t_R$	t_R = 1 ms Largeur de bande: 2 000 Hz = 2kHz	2K00K2XAN

TABLEAU 3-10 (*fin*)

Description de l'émission	Largeur de bande nécessaire		Désignation de l'émission
	Formule	Exemple de calcul	
3 Haute fréquence (code temporel)			
Code temporel, notamment télégraphie	$B_n = BK + 2M$	$B = 1/s$ $M = 1$ $K = 5$ Largeur de bande: 7 Hz	7H00A2XAN
4 Basse fréquence (code temporel)			
Partie principale du code temporel utilisée pour la mesure de la phase	$B_n = 2/t_R$	$t_R = 1$ ms Largeur de bande = 2 000 Hz = 2 kHz	2K00K2XAN
Code temporel, notamment télégraphie	$B_n = BK + 2M$	$B = 1/s$ $M = 1$ $K = 3$ Largeur de bande: 5 Hz	5H00A2XAN

4 Possibilités de prévention et de suppression des brouillages

Dans le but de prévenir les brouillages, l'administration du Japon a décidé, en octobre 2006, de n'autoriser que les systèmes CPL de type *Indoor*, autrement dit d'interdire les systèmes CPL de type *Access*.

Une autre façon de prévenir – ou du moins d'atténuer suffisamment – les brouillages est de limiter les émissions des systèmes et dispositifs CPL à un niveau suffisamment faible pour garantir la protection d'un service de radiocommunication ou de radioastronomie.

Plusieurs techniques permettraient de concevoir des systèmes d'alimentation électrique compatibles avec la transmission numérique à haut débit: blindage total contre les rayonnements, filtres de blocage RF au niveau des points de transition, etc.

4.1 Facteurs et méthodes d'atténuation applicables aux courants porteurs en ligne

Les systèmes CPL pourraient permettre de faire face à la demande et à l'utilisation d'accès à l'Internet haut débit, qui ne cessent de croître partout dans le monde. Mais ces systèmes émettent involontairement des rayonnements RF, qui sont susceptibles de brouiller les récepteurs radioélectriques.

Pour transporter les signaux de télécommunication, les systèmes CPL peuvent utiliser des lignes basse tension internes aux bâtiments, des lignes basse tension extérieures (aériennes ou souterraines), des lignes moyenne tension extérieures ou une combinaison de ces possibilités.

Si certains récepteurs radioélectriques peuvent subir des brouillages par conduction (notamment les récepteurs d'ondes décamétriques dont le sous-système d'antenne interne utilise le cordon d'alimentation), le brouillage par couplage de la plupart des autres récepteurs se fait par rayonnement.

Pour mettre en place des réglementations en matière de CPL, les administrations nationales peuvent se contenter de limiter les niveaux d'émission à des fins de protection contre les brouillages ou adopter des règles qui combinent limites des émissions et facteurs d'atténuation. La présente section

fournit des informations sur les facteurs d'atténuation, mesures que les administrations nationales pourraient être amenées à envisager.

4.1.1 Affaiblissement des signaux transmis par conduction

L'une des difficultés majeures que rencontrent certaines administrations est la protection des récepteurs d'ondes décamétriques dans les maisons ou les appartements en présence d'un système CPL en service dans une maison ou un appartement mitoyen. Dans ce cas, les émissions par conduction peuvent être le mécanisme primaire de brouillage par couplage.

Certaines études présentent des mesures qui montrent que l'affaiblissement des signaux CPL au niveau des prises électriques dans les habitations du fait du passage à travers un compteur électrique et un disjoncteur est de l'ordre de 30 dB à 40 dB. Il semblerait que cet affaiblissement soit dû à l'effet combiné du compteur électrique lui-même et du comportement électrique complexe des réseaux d'alimentation situés à l'intérieur des bâtiments. On a constaté que l'affaiblissement des signaux CPL causé par les compteurs électriques contenant des circuits électroniques destinés à la commande et au suivi à distance peut atteindre 20 dB à certaines fréquences et que la dépendance de l'affaiblissement avec la fréquence est relativement complexe. En conséquence, si un résident d'un immeuble utilise une technologie CPL et qu'un de ses voisins immédiats possède un récepteur de radiodiffusion en ondes décamétriques connecté au réseau électrique, l'affaiblissement global des signaux CPL par conduction entre les deux appartements peut être de l'ordre de 60 à 80 dB.

Etant donné que les techniques de construction des bâtiments et les configurations des réseaux électriques varient d'un pays à l'autre, ces résultats peuvent s'appliquer ou non selon les pays. Pour décider s'il convient de tenir compte de cet affaiblissement comme facteur d'atténuation dans les réglementations nationales à adopter, les administrations de chaque pays doivent donc étudier comment des bâtiments types affaiblissent les signaux.

Par ailleurs, l'ajout d'un filtre sur le réseau électrique peut permettre d'augmenter l'affaiblissement. Il est donc envisageable d'insérer un filtre entre le connecteur mâle du cordon d'alimentation des récepteurs radio et la prise électrique femelle à laquelle il vient se connecter. Compte tenu des différentes configurations matérielles des connecteurs mâles et femelles selon les pays, les administrations doivent étudier la faisabilité de cette approche et la disponibilité de tels filtres dans leur pays. Pour de plus amples informations sur la distance de séparation, se reporter au § A3.5.

4.1.2 Exclusions de bandes de fréquences

Certaines administrations peuvent exiger que les systèmes CPL excluent certaines bandes désignées, c'est-à-dire qu'ils ne placent pas de fréquence porteuse dans ces bandes. Cette règle peut éventuellement se limiter aux câbles extérieurs aériens de moyenne tension, aux câbles extérieurs de basse et moyenne tensions, ou aux câbles souterrains (basse tension et moyenne tension).

On peut par exemple citer le cas d'une administration qui a imposé une telle réglementation dans certaines bandes de fréquences entre 2 MHz et 22 MHz ainsi que dans la bande 74,8-75,2 MHz, et ce afin de protéger les bandes de fréquences attribuées au service mobile aéronautique et au service de radionavigation pour la sécurité de la vie humaine dans le domaine aéronautique. En l'occurrence, la réglementation n'a pas été appliquée aux câbles de basse tension ni aux câbles souterrains de moyenne tension, mais seulement aux câbles extérieurs aériens de moyenne tension.

4.1.3 Zones d'exclusion géographiques

Les administrations peuvent interdire aux opérateurs CPL d'utiliser certaines bandes de fréquences à une certaine distance de stations radioélectriques assujetties à licence pour certains types de services.

Une administration a par exemple interdit l'utilisation des CPL dans la bande de fréquences 2,1735-2,1905 MHz (réservée au système mondial de détresse en mer) à moins de 1 km de quelque 110 stations radioélectriques maritimes désignées. Elle a également interdit aux opérateurs CPL d'utiliser la bande 73,0-74,6 MHz (fréquences utilisées par la radioastronomie) à moins de 65 km d'un observatoire de radioastronomie (réglementation applicable uniquement aux câbles aériens de moyenne tension) ou à moins de 47 km d'un tel observatoire (dans le cas des lignes souterraines de moyenne tension et des lignes aériennes de basse tension).

Ces réglementations fondées sur la distance s'appliqueraient aux sociétés mettant en œuvre des systèmes CPL pour fournir un accès à Internet mais pas aux réseaux situés à l'intérieur des bâtiments et reposant sur des équipements CPL privés.

Les distances auxquelles les systèmes CPL peuvent causer des brouillages préjudiciables dépendent fortement de facteurs tels que les caractéristiques du réseau électrique local ou la conception et la topologie d'un système CPL particulier. Etant donné que ces facteurs varient considérablement d'un endroit à l'autre, les résultats d'une étude concernant un système donné ne peuvent raisonnablement pas s'appliquer à des configurations différentes de celles utilisées pour l'étude en question. Il importe donc que les administrations veillent tout particulièrement à prendre des décisions de réglementation uniquement sur la base d'analyses qui reflètent précisément leur situation nationale.

4.1.4 Exigence relatives aux zones de consultation

Pour améliorer la détection et l'atténuation des brouillages, les administrations peuvent exiger des opérateurs de systèmes CPL qu'ils signalent, à l'avance, la mise en place de leurs installations aux exploitants de certains services radioélectriques.

Une administration exige par exemple des opérateurs CPL qu'ils signalent 30 jours à l'avance toute installation dans les bandes de fréquences et aux emplacements suivants:

– dans la bande 1,7-30 MHz et à moins de 4 km de certaines stations publiques de contrôle et de quelques 60 stations radioélectriques de Terre ou aéronautiques fonctionnant en ondes décamétriques;
– dans la bande 1,7-80 MHz et à moins de 4 km de quelque 16 sites de radioastronomie;
– dans la bande 1,7-30 MHz et à moins de 37 km de trois sites désignés de réception radar;
– dans la bande 1,7-80 MHz et à moins de 1 km de certains autres sites publics désignés;
– aux personnes chargées de coordonner les fréquences des services de police, des pompiers et des services médicaux d'urgence qui bénéficient d'une licence pour exploiter des services radioélectriques mobiles dans la zone concernée.

Lors de la planification d'opérations dans les zones de consultation définies ci-dessus, les opérateurs CPL sont tenus de fournir les informations suivantes:

1) nom de l'opérateur CPL;
2) fréquences d'exploitation du service CPL;
3) codes postaux desservis par le service CPL;
4) constructeur et type de l'équipement CPL à déployer;
5) coordonnées du point de contact (téléphone et adresse e-mail);
6) date proposée ou date effective de début du service CPL.

4.1.5 Techniques adaptatives de réduction des brouillages

Les administrations peuvent exiger des opérateurs CPL qu'ils utilisent des équipements mettant en œuvre des techniques adaptatives d'atténuation des brouillages, la réalisation restant sous le contrôle des opérateurs. Les opérateurs pourraient ainsi, à la demande d'un tiers, couper le signal ou en

réduire l'intensité afin d'atténuer les brouillages à des endroits particuliers et dans des bandes de fréquences données. Les administrations pourraient exiger que les dispositifs de coupure réduisent les émissions d'une quantité fixe (10 dB ou 20 dB par exemple) au-dessous des limites d'émission applicables.

Il serait aussi envisageable de développer des équipements CPL capables de capter les signaux radioélectriques émis par certains services et d'arrêter les émissions CPL, de façon adaptative et automatique, afin de protéger ces signaux. Les administrations pourraient, à condition que de tels équipements soient réalisables, spécifier les services radioélectriques ou les bandes de fréquences à protéger.

Les administrations peuvent également exiger que les opérateurs CPL utilisent des équipements dotés d'une fonction télécommandée d'arrêt des transmissions RF, utilisable en dernier recours pour désactiver toute unité qui causerait des brouillages préjudiciables.

4.1.6 Procédure de réclamation en cas de brouillages

Les administrations doivent s'assurer qu'il existe des procédures de réclamation en cas de brouillages causés par des systèmes CPL ainsi que des procédures de réponse.

De telles procédures pourraient, par exemple, exiger du demandeur qu'il prenne des mesures raisonnables pour s'assurer que les brouillages existent effectivement et qu'ils sont causés par un système CPL. Le demandeur devrait ensuite avertir l'opérateur CPL. Ce dernier serait tenu de faire des recherches pour une durée jugée raisonnable au vu du type de service brouillé: par exemple, recherche de la cause du problème et réduction des brouillages sous 24 heures en cas de perturbation des services de sécurité publique, mais dans un délai supérieur en cas de brouillage de la radiodiffusion en ondes décamétriques. En cas d'échec de cette procédure, l'exploitant pourrait déposer une plainte auprès de l'organe administratif approprié, qui affecterait ses ressources juridiques et techniques afin de réduire les brouillages préjudiciables.

4.1.7 Base de données de l'opérateur CPL

Pour réduire plus efficacement les brouillages, les administrations pourraient exiger des opérateurs CPL qu'ils créent une base de données publique des sites d'exploitation CPL. Cette base de données pourrait être gérée par une association d'industriels, par l'administration elle-même ou par une tierce partie indépendante. Pourraient y figurer entre autres:

1) le nom de l'opérateur CPL;
2) les fréquences d'exploitation du service CPL;
3) les codes postaux desservis par le service CPL;
4) le constructeur et le type de l'équipement CPL à déployer;
5) les coordonnées du point de contact (téléphone et adresse e-mail);
6) la date proposée ou la date effective de début du service CPL.

Il n'est pas nécessaire que le gestionnaire de la base de données intervienne en cas de réclamation concernant des brouillages ou au cours des recherches qui s'y rapportent, mais des informations contenues dans la base pourraient être utilisées à des fins d'investigation.

4.2 Etude de plusieurs techniques d'atténuation

4.2.1 Etude des techniques d'atténuation utilisées au Brésil

4.2.1.1 Introduction et informations de caractère général

La présente section expose les résultats – communiqués par l'administration du Brésil – de mesures effectuées sur le terrain sur des systèmes de communications CPL au Brésil. L'objectif de ces essais était d'évaluer l'efficacité de techniques d'atténuation mises en œuvre dans des systèmes CPL de deuxième génération. Les brouillages radioélectriques et les niveaux de rayonnement émis par le réseau ont été étudiés. Ces rayonnements ont été comparés avec les limites définies dans la Recommandation K.60[12] de l'UIT-T ainsi qu'avec les limites fixées par une autre administration.

4.2.1.2 Configuration des essais

Les essais ont été effectués sur une installation type de lignes aériennes basse tension de 240 m de long. Le réseau était composé de lampadaires publics de sorte que le bruit produit par des moteurs et des appareils électriques soit réduit au minimum.

La méthodologie retenue reposait sur la Recommandation K.60[12] de l'UIT-T et sur les procédures FCC 04-245.

Pour mesurer les plus hauts niveaux d'émission parasite, l'équipement CPL a été réglé sur son niveau maximal de puissance de sortie (environ -58 dBm/Hz).

Pour mesurer la composante magnétique des rayonnements au-dessous de 30 MHz, on a utilisé une antenne-cadre étalonnée, un tripode et un analyseur de spectre (conformément à la procédure de mesures décrite dans la Recommandation K.60 de l'UIT-T, un détecteur de quasi-crête (CISPR 16-1-1) pourrait remplacer l'analyseur de spectre). L'installation est illustrée à la Fig. 4-1.


FIGURE 4-1

Réseau de distribution et antenne-cadre



Report 2158-4-01

---

[12] Le paragraphe 1 (Champ d'application) de la Recommandation K.60 de l'UIT-T – Niveaux d'émission et méthodes de test applicables aux réseaux de télécommunication filaires pour minimiser les perturbations électromagnétiques des services radiophoniques (2008-02) – indique que l'objet de la Recommandation est de servir de guide aux administrations lors de l'examen des réclamations concernant des brouillages entre des systèmes de télécommunication et que cette Recommandation ne vise pas à fixer des critères ou des recommandations en matière de conformité à des fins de protection du spectre radioélectrique.

L'analyseur de spectre a été réglé sur une largeur de bande d'une résolution de 9 kHz avec détecteur de crête. La comparaison des mesures avec les valeurs obtenues en utilisant un détecteur de quasi-crête fait apparaître une différence inférieure à 4 dB.

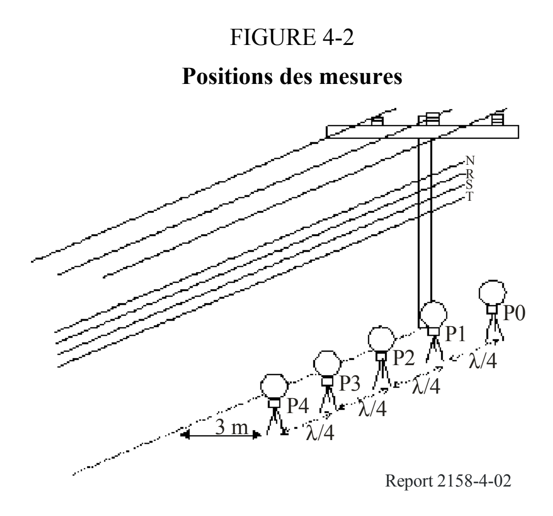
Les mesures ont été effectuées à une distance de séparation horizontale de 3 m, correspondant à la longueur du segment joignant la projection de la ligne électrique sur le sol et le point de référence de l'antenne utilisée pour les mesures.

Comme le montre la Fig. 4-2, les essais ont été effectués le long de la ligne, à partir du point d'injection CPL, à des espacements de 0, ¼, ½, ¾ et 1 longueur d'onde, sur la base de la fréquence située au milieu de la bande utilisée par l'équipement. Ces positions correspondent respectivement aux points P0, P1, P2, P3 et P4.

A chaque position, trois mesures ont été effectuées, une pour chaque orientation de l'antenne-cadre magnétique, et ce afin de mesurer les trois composantes orthogonales du champ.

FIGURE 4-2

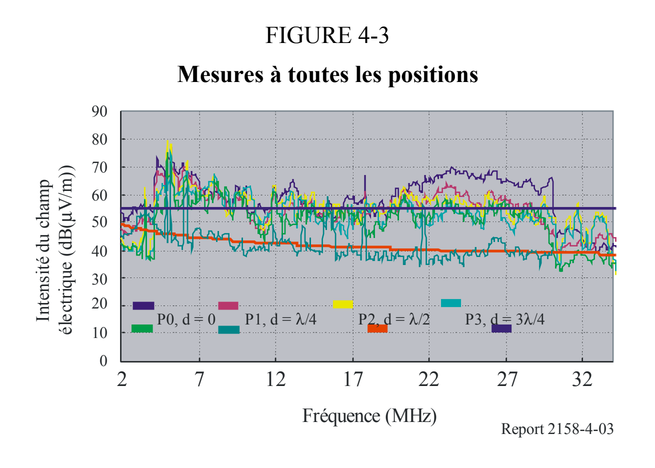
Positions des mesures



La Fig. 4-3 le montre, lorsque l'équipement est réglé à la puissance injectée maximale, le champ électrique est très supérieur aux limites de quasi-crête fixées par une autre administration. Une correction de distance a été appliquée à la valeur limite selon le facteur d'extrapolation adopté par une autre administration (voir Annexe 3.6). Le balayage du spectre avec et sans la présence du système CPL montre que le signal CPL cause des brouillages aux services existants. Cela étant, on observe que la puissance rayonnée diminue considérablement le long de la ligne lorsque l'on s'éloigne du point d'injection.

FIGURE 4-3

Mesures à toutes les positions



S'agissant de l'atténuation des brouillages, trois configurations ont été analysées.

4.2.1.3 Filtres coupe-bande

A l'origine, les filtres coupe-bande étaient configurés pour affaiblir le niveau d'un signal dans des bandes de fréquences prédéterminées. On peut observer, à la Fig. 4-4, l'effet de trois filtres coupe-bande au niveau des bandes de fréquences 4,8-4,9 MHz, 14-15 MHz et 22-23 MHz. Dans les trois cas, l'intensité du rayonnement tombe en deçà des niveaux fixés par la Recommandation K.60[12] de l'UIT-T. De plus, la démodulation du signal radioélectrique a confirmé l'efficacité de ces techniques d'atténuation dans des bandes d'exclusions prédéfinies.

FIGURE 4-4

Mesures obtenues avec des filtres coupe-bande

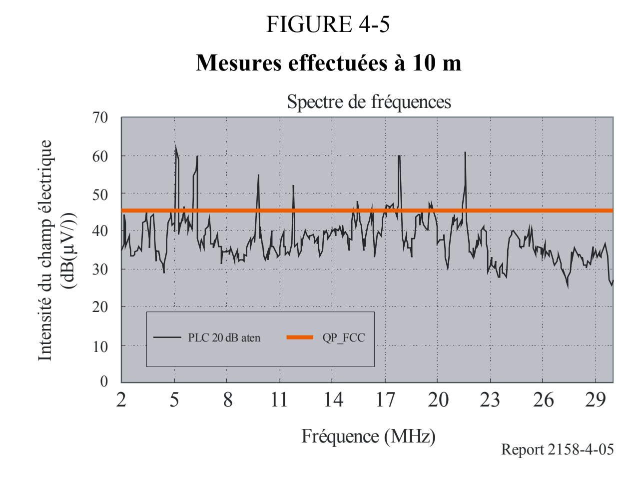
Report 2158-4-04

4.2.1.4 Réduction de la puissance

En dernier lieu, la puissance injectée a été diminuée jusqu'à ce que les rayonnements atteignent les limites fixées par la FCC. Cet essai a été effectué sur une petite section du réseau, au niveau de laquelle il était possible de faire des mesures à 10 m de distance. La Fig. 4-5 montre une légère augmentation du bruit de fond dû aux CPL. Les pics présentent des signaux RF non perturbés par les émissions CPL.

FIGURE 4-5

Mesures effectuées à 10 m



4.2.1.5 Conclusion

Les essais ont démontré que la mise en place de techniques d'atténuation telles que les filtres coupe-bande et le contrôle de la puissance de sortie devrait permettre de protéger efficacement les systèmes exploitant la bande des fréquences décamétriques.

Au vu des résultats de ces essais et compte tenu du manque d'infrastructures offrant un accès à haut débit et de la nécessité de promouvoir l'inclusion numérique, l'administration du Brésil examine l'opportunité d'établir des réglementations, des règles et des critères pour permettre la coexistence, avec les systèmes exploitant sous licence la bande des fréquences décamétriques, des systèmes CPL fonctionnant sur des lignes électriques basse tension (BT) et moyenne tension (MT) dans la bande de fréquences 1 705 kHz-50 MHz.

4.2.2 Effets de l'intermodulation sur l'amplitude du filtrage coupe-bande dans les systèmes CPL

Pour remédier aux brouillages causés aux stations des services d'amateur et d'amateur par satellite par un système CPL dans la bande d'ondes décamétriques, on a élaboré une technique d'atténuation appelée «technique de filtrage coupe-bande». Cependant, les mesures ont démontré que les effets de l'intermodulation dans d'autres équipements connectés au câblage du réseau électrique pouvaient considérablement limiter l'efficacité de cette approche.

4.2.2.1 Technique de mesure

On a installé deux dispositifs CPL pour qu'ils communiquent entre eux, le réseau de stabilisation d'impédance de ligne (LISN) alimentant une unité appelée «unité distante»: l'affaiblissement de 20 dB au niveau du signal RF stimule un système CPL distant situé dans une autre pièce. En conséquence, le dispositif CPL distant ne contribue que légèrement à l'émission mesurée. Ces dispositifs sont appelés «adaptateurs de lignes électriques» (PLA).

Bien que les adaptateurs PLA locaux et distants communiquent entre eux, aucune donnée n'est envoyée. Des mesures ont été effectuées sur 400 fréquences caractéristiques, avec une largeur de bande de mesure de 9 kHz et un détecteur de quasi-crête (QP). Les résultats sont présentés sur la Fig. 4-6, la limite de 60 dB(µV) de quasi-crête de Classe B EN55022 étant indiquée à des fins de comparaison.

En raison du pas de fréquence, les coupures plus étroites, par exemple dans les bandes des 10 MHz, 18 MHz et 24 MHz attribuées au service d'amateur, ne sont pas indiquées avec leur amplitude complète, mais ont toutes une amplitude d'au moins 30 dB, certaines présentant une amplitude de plus de 40 dB au centre.

Un dispositif non linéaire utilisant le circuit de la Fig. 4-7 a été connecté au réseau électrique. Ce système est très semblable à plusieurs des petits blocs d'alimentation examinés: les valeurs des composantes varient selon les modèles.

FIGURE 4-6

Bande de fréquences présentant les coupures spectrales

4.2.2.2 Résultats

La Fig. 4-8 présente les effets de la connexion du redresseur indiqué sur la Fig. 4-7 à une prise de courant adjacente. Il apparaît que l'amplitude des coupures à 3,5, 14, 18, 21, 24 et 28 MHz est ramenée à environ 20 dB. En outre, on constate une forte augmentation des produits hors bande, avec une amplitude de crête sensiblement supérieure au niveau de quasi-crête (QP). L'accroissement des émissions dans la gamme 0,5-2 MHz comprend la bande du service d'amateur à 1,8 MHz et la bande du service de radiodiffusion en ondes hectométriques. Au-dessus de 27 MHz, l'accroissement des émissions risque d'affecter les bandes des 28 MHz et 50 MHz attribuées au service d'amateur, bien que les émissions au-dessus de 30 MHz ne soient pas indiquées sur la Fig. 4-8.

La Fig. 4-9 représente la courbe composite des Fig. 4-7 et Fig. 4-8 superposées.

On a démonté un petit bloc d'alimentation à commutation à unité enfichable et constaté que la partie «redresseur» était analogue à la Fig. 4-6, à ceci près que le condensateur de lissage était plus grand et que les diodes étaient différentes. L'entrée du secteur est reliée directement au pont-redresseur par le biais d'une résistance à 5,6 Ω et le filtre de brouillage RF se trouve après le redresseur. Cela signifie que les signaux RF émis par un adaptateur PLA situé à proximité peuvent pénétrer directement dans le pont-redresseur et que les produits d'intermodulation et les harmoniques créés par ce pont-redresseur peuvent réintégrer le bloc d'alimentation.

FIGURE 4-7

Simulation d'un petit bloc d'alimentation

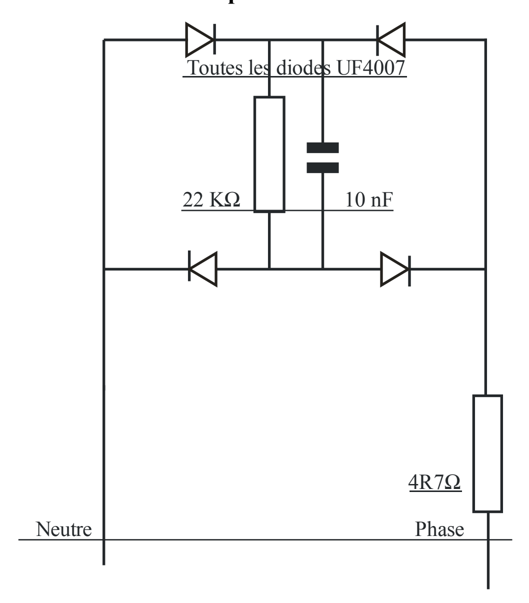


FIGURE 4-8

Effets de l'intermodulation sur les coupures

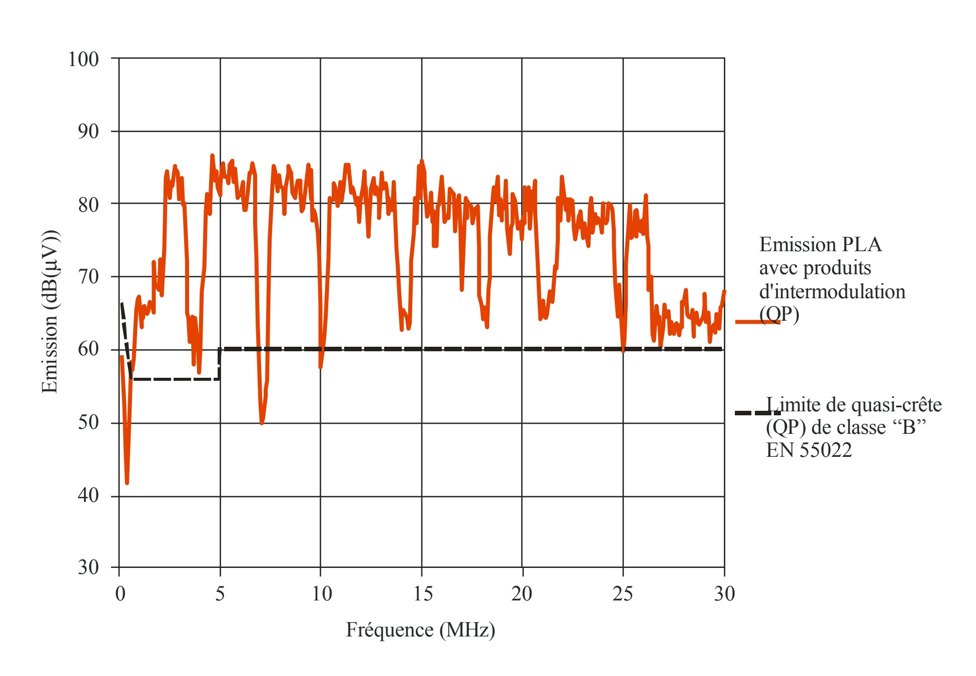
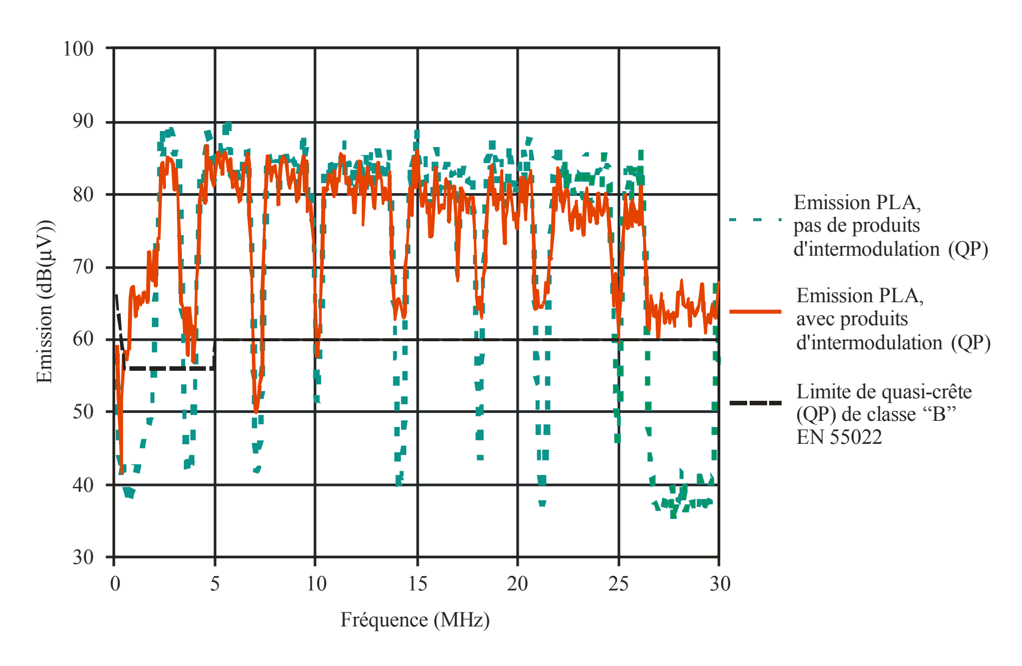


FIGURE 4-9

Courbe composite des Figs 3 et 4 superposées



On a également effectué des essais avec un seul adaptateur PLA, ce qui correspond peut-être au «cas le plus défavorable», puisque l'adaptateur PLA établit constamment des appels tout en recherchant un autre adaptateur PLA. Cela peut également correspondre au cas dans lequel deux PLA sont branchés à proximité l'un de l'autre, comme cela arrive parfois. Dans l'un ou l'autre cas, le niveau de quasi-crête (QP) des produits d'intermodulation est plus élevé que les résultats présentés sur la Fig. 4-8 (où un adaptateur PLA local communique avec un adaptateur PLA distant). Sur une fréquence caractéristique de 14,182 MHz, à l'intérieur de la «coupure» à 14 MHz, les niveaux d'émission QP pour un seul adaptateur PLA sont les suivants:

– pas de charge de redressement: 44 dBμV;
– lorsque l'unité d'alimentation (PSU) est chargée: 60 dBμV;
– lorsque l'unité d'alimentation (PSU) est déchargée: 65 dBμV;
– avec le redresseur indiqué sur la Fig. 4-7: 73 dBμV.

La coupure à 14 MHz est relativement importante et nettement inférieure à la limite de 60 dBμV de quasi-crête de Classe B EN55022, mais en pareil cas, il a été établi que l'unité PSU en charge pouvait amener le niveau jusqu'à la limite. Il a également été observé que lorsqu'elle était déconnectée de son adaptateur PLA, c'est-à-dire lorsqu'elle était déchargée, l'unité PSU pouvait créer des produits d'intermodulation dépassant d'environ 5 dB la limite. L'unité PSU en tant que telle est relativement silencieuse dans les bandes d'ondes décamétriques, si bien qu'il semble que les émissions ci-dessus soient causées par le redresseur de l'unité PSU qui crée des produits d'intermodulation provenant des signaux PLA.

On a également testé un chargeur pour téléphone mobile, qui créait lui aussi des produits d'intermodulation, en particulier lorsqu'il était déchargé, encore que ces produits étaient inférieurs d'environ 2 dB à l'unité PSU du PLA lorsqu'elle était déchargée. Il est évident que de nombreux types différents de systèmes d'alimentation à commutation peuvent être raccordés au secteur et que certains d'entre eux peuvent occasionner une intermodulation nettement plus importante que les deux types de systèmes décrits plus haut.

4.2.2.3 Conclusion

Bien que la mise en œuvre du filtrage coupe-bande dans les systèmes CPL se traduise par une très nette amélioration de la réduction de la probabilité de brouillage causé aux services d'amateur et d'amateur par satellite des systèmes CPL intérieurs, les résultats des mesures effectuées lors de ces essais ont démontré que les effets de la non-linéarité d'autres dispositifs pouvaient avoir de profondes répercussions en réduisant sensiblement l'amplitude des coupures. Néanmoins, les coupures continuent à remplir des fonctions très utiles, même en présence d'intermodulation mais le meilleur moyen de réduire les effets de cette intermodulation consiste à limiter les niveaux de puissance appliqués au système de distribution électrique.

5 Conclusions générales

Le présent rapport illustre les risques de brouillages de divers services de radiocommunication en présence d'émissions provenant de systèmes et de dispositifs CPL. Il décrit les caractéristiques des émissions radioélectriques des systèmes CPL ainsi que les caractéristiques et les critères de protection des dispositifs de radiocommunication perturbés par ces systèmes. Il examine en outre les méthodes susceptibles d'atténuer les brouillages provenant des émissions CPL.

Annexe 1

Considérations relatives au bruit, au rayonnement et à la propagation

A1 Considérations relatives au bruit, au rayonnement et à la propagation

A1.1 Niveau de bruit dans la bande des fréquences décamétriques

La présente section fournit des explications d'ordre général sur le bruit dans la bande des fréquences décamétriques (3-30 MHz). Pour des informations plus détaillées sur les niveaux de bruit, se reporter aux sections correspondantes dans le présent Rapport relatives aux diverses utilisations du spectre radioélectrique.

La sensibilité d'un récepteur radio de qualité est déterminée par le bruit produit dans ses étages de bas niveau, bruit qui provient des composants actifs présents dans l'équipement. Ce niveau de bruit définit la sensibilité absolue du récepteur. Cela étant, dans la bande des fréquences décamétriques, la communication n'est généralement pas limitée par le bruit interne, mais par d'autres sources de bruit, qui sont extérieures au récepteur. L'ensemble de ces sources de bruit *constituent* l'*environnement de bruit ambiant*.

A1.1.1 Le bruit ambiant

Dans la bande des fréquences décamétriques, le bruit ambiant se compose de deux parties: le bruit ambiant résiduel irréductible, qui est prévisible et qui peut varier selon la saison, l'heure et l'emplacement, et le bruit occasionnel provenant de sources artificielles locales. Ces deux sources de bruit sont désignées par les termes «bruit de fond ambiant» et «bruit occasionnel». Leur combinaison détermine le niveau minimal de signal utilisable.

Le bruit occasionnel produit par des dispositifs conformes aux normes CEM applicables peut largement dépasser le bruit de fond. Cela étant, la réception de signaux de bas niveau dans la bande des fréquences décamétriques reste possible du fait de la nature aléatoire, et donc probabiliste, du bruit occasionnel. De nombreux dispositifs émettent ainsi des rayonnements proches des limites

fixées par les normes, mais seulement sur quelques fréquences discrètes ou sur une bande étroite de fréquences. De plus, la plupart des bruits occasionnels sont relativement transitoires.

Les services de communication dans la bande des fréquences décamétriques doivent tenir compte de la nature variable de la propagation à ces fréquences. Il convient de choisir la fréquence d'exploitation et l'horaire d'émission de façon à optimiser la probabilité d'obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant. Certains systèmes du service fixe ou du service mobile mettent en œuvre des protocoles d'exploitation suffisamment souples, de sorte que, si le bruit occasionnel empêche la communication à un moment donné, l'émission peut être répétée ultérieurement, après que les brouillages ont cessé. Dans le cas des systèmes automatiques ou adaptatifs, cette fonctionnalité peut être intégrée au protocole d'exploitation. En revanche, le service de radiodiffusion en ondes décamétriques est classiquement tenu de maintenir une qualité de service satisfaisante à une fréquence donnée, vers une zone bien déterminée et pour des durées comprises entre une demi-heure et plusieurs heures, et ce malgré des conditions de propagation variables.

Sources de bruit naturel

a) Le bruit atmosphérique: l'une des sources majeures du bruit atmosphérique est l'activité kéraunique quasi-continue au voisinage de l'Equateur. Les brouillages qu'elle produit se propagent au reste du monde par réflexion ionosphérique. Le niveau de bruit global dépend de la fréquence, de l'heure de la journée, de la saison et de l'emplacement. Dans les zones tempérées, ce type de bruit est relativement faible, mais on observe toutefois, à certains moments, des pointes de bruit de courte durée dues à l'activité électrique locale de l'atmosphère.

b) Le bruit cosmique: il provient de l'espace extra atmosphérique, principalement du Soleil et de la Voie lactée (la contribution de cette dernière est également appelée bruit galactique). Dans la bande des fréquences décamétriques, le bruit cosmique atteignant l'antenne dépend de l'effet d'écran de l'ionosphère et se situe généralement à des niveaux inférieurs au bruit industriel. Aux fréquences décamétriques inférieures, il est d'ailleurs impossible, dans la pratique, de distinguer le bruit cosmique du bruit de fond général provenant d'autres sources.

Sources de bruit artificiel

Le bruit artificiel se compose de deux parties:

Premièrement, le bruit provenant d'un grand nombre de sources relativement distantes. Il s'agit en fait de bruit blanc et de l'une des composantes du bruit de fond ambiant. Les environnements sont souvent classés selon les catégories suivantes: quartier urbain, quartier résidentiel, zone rurale et zone rurale calme. Le bruit artificiel est émis par des équipements électriques, électroniques ou radiofréquences. Du point de vue de l'utilisateur de services radio, ces environnements diffèrent par le niveau de bruit et la durée pendant laquelle le bruit persiste.

Il existe également un bruit occasionnel provenant de sources locales, dont le niveau dépend du type d'environnement et de la densité d'utilisation de l'équipement situé à proximité. Dans les zones rurales et dans les zones rurales calmes, le bruit occasionnel est en principe rare et les communications dans la bande des fréquences décamétriques sont donc optimales.

A1.1.2 Mesure du bruit de fond ambiant

Des mesures de bruit de fond ambiant ont été effectuées par plusieurs organismes, notamment MASS Consultants, BNetzA, la BBC, Qinetiq[13] et la RSGB[14]. La réalisation de ces mesures requiert un soin tout particulier. Il est notamment essentiel de choisir une fréquence radio non occupée par un signal radioélectrique existant pour éviter de confondre, avec du bruit, les signaux radio intentionnels au voisinage d'une fréquence donnée.

En raison des taux d'occupation élevés dans les bandes de fréquences décamétriques et compte tenu de la méthode de mesure qu'il convient d'utiliser, un simple balayage de fréquences dans une bande décamétrique à l'aide d'un appareil de mesures CEM classique avec une largeur de bande standard de 9 kHz ne peut fournir une mesure exacte du niveau de bruit de fond. Par ailleurs, les mesures effectuées à l'aide d'une antenne-cadre CEM classique peuvent être limitées par le bruit du système de réception et non par le bruit d'origine externe.

Pour effectuer des mesures par balayage du niveau réel de bruit de fond ambiant aux fréquences décamétriques, il faut donc utiliser une largeur de bande beaucoup plus étroite, de l'ordre de 100-200 Hz. Les mesures sont ensuite converties vers une largeur de bande de 9 kHz à des fins de comparaison.

En règle générale, il n'est pas possible de mesurer en pratique le bruit de fond ambiant dans des zones industrielles ou des quartiers d'affaires où le bruit occasionnel dépasse en permanence le bruit de fond. Dans un quartier résidentiel, il est souvent assez commode de choisir une période pendant laquelle le bruit occasionnel n'est pas significatif, ce qui suppose toutefois que les mesures soient effectuées à une distance raisonnable (supérieure à 10 m) de tout bâtiment ou habitation et que l'antenne de mesure soit convenablement positionnée. Pour interpréter les courbes de bruit de fond ambiant publiées, il importe de prendre en compte les conditions dans lesquelles les mesures ont été réalisées: largeur de bande, détecteur utilisé (crête, quasi-crête ou moyenne), type d'antenne, etc.

A1.1.3 Détermination du niveau de bruit

Les éléments qui suivent sont extraits de la Recommandation UIT-R P.372. Les données sur le bruit radioélectrique atmosphérique dû aux éclairs proviennent d'une étude approfondie du CCIR menée dans les années 60. Bien que le réchauffement de la planète puisse modifier la fréquence et l'intensité de l'activité orageuse et qu'un réexamen de cette étude pourrait apporter des éléments d'appréciation quant à la validité actuelle de ces données, rien ne prouve qu'elles aient changé avec le temps. Les données sur le bruit artificiel proviennent, pour leur part, d'une étude menée aux Etats-Unis dans les années 70, principalement sur le sol américain.

Les niveaux contenus dans la Recommandation sont utilisés comme référence dans l'ensemble du présent Rapport, même si la question de leur validité en Europe et pour la période actuelle reste ouverte. A noter que la CEPT a mené une campagne de mesure du bruit de fond en Europe en vue de déterminer si les niveaux de bruit de fond dans les bandes de fréquences kilométriques, hectométriques et décamétriques figurant dans la Recommandation UIT-R P.372 sont représentatifs ou non des niveaux actuellement présents en Europe.

---

[13] Qinetiq est la société technologique de l'armée britannique. Elle est constituée de la plus grande partie de l'ex-DERA (Defence Evaluation & Research Agency/agence gouvernementale de recherche et d'évaluation de l'armée britannique), juin 2001.

[14] Radio Society of Great Britain.

A1.1.3.1 Niveaux de bruit thermique, artificiel, cosmique et atmosphérique

Les calculs de bruit et de brouillage sont effectués sur la base d'une largeur de bande de référence de 1 Hz afin de pouvoir prendre en compte les grands types de modulation utilisés dans les systèmes radio fonctionnant dans la bande des fréquences décamétriques.

Les sources de bruit considérées sont le bruit thermique inhérent aux systèmes radio, le bruit artificiel et le bruit radioélectrique, qui fait l'objet de la Recommandation UIT-R P.372.

Bruit thermique par Hertz:

$$N_0/\text{Hz} = kT_0 \text{ W/Hz}$$

où:

k: constante de Boltzmann = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K

T_0 = 290 K

Le bruit radioélectrique décrit dans la Recommandation UIT-R P.372 est utilisé dans les calculs. Il comporte des composantes de bruit artificiel, cosmique et atmosphérique, qui sont détaillées ci-dessous.

La valeur médiane au-dessus de kT_0 s'exprime comme suit:

$$F_{am} = c - d \log (f) \qquad \text{dB}$$

Les valeurs de c et d figurent dans la Recommandation de l'UIT-R mentionnée ci-dessus et sont rappelées au Tableau A1-1. f est la fréquence (MHz).

TABLEAU A1-1

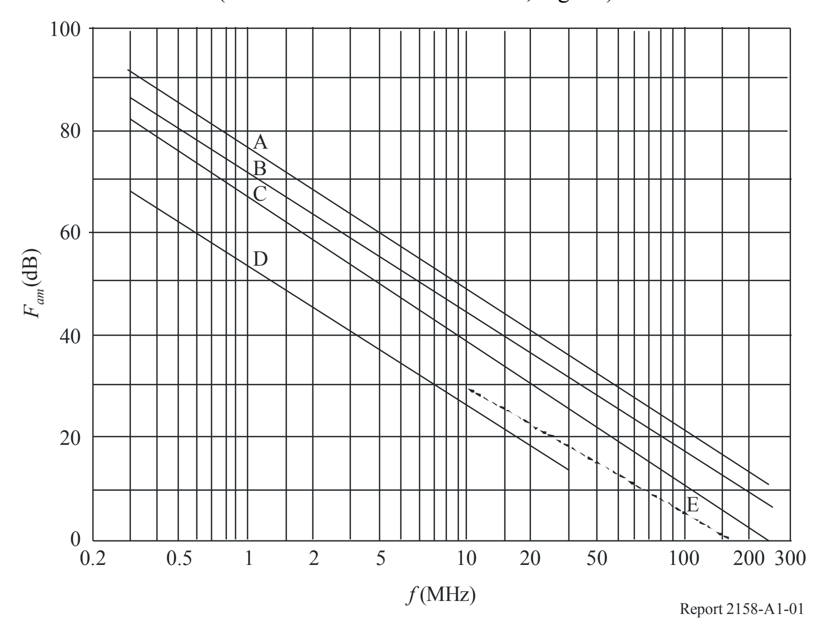
Valeurs des constantes *c* et *d* tirées de la Recommandation UIT-R P.372 pour différentes catégories d'environnement

Catégorie d'environnement	*c*	*d*
Quartier urbain	76,8	27,7
Quartier résidentiel	72,5	27,7
Zone rurale	67,2	27,7
Zone rurale calme	53,6	28,6
Bruit cosmique (10-80 MHz)	52,0	23,0

Les niveaux correspondants sont indiqués à la Fig. A1-1:

FIGURE A1-1

Valeurs médianes de la puissance du bruit artificiel mesurées avec une courte antenne verticale unipolaire sans perte placée au sol
(Recommandation UIT-R P.372, Fig. 10)



Catégories environnementales:
Courbe A: Quartier urbain
Courbe B Quartier résidentiel
Courbe C: Zone rurale
Courbe D: Zone rurale calme
Courbe E: Bruit cosmique

Le bruit atmosphérique est modélisé comme suit:

TABLEAU A1-2

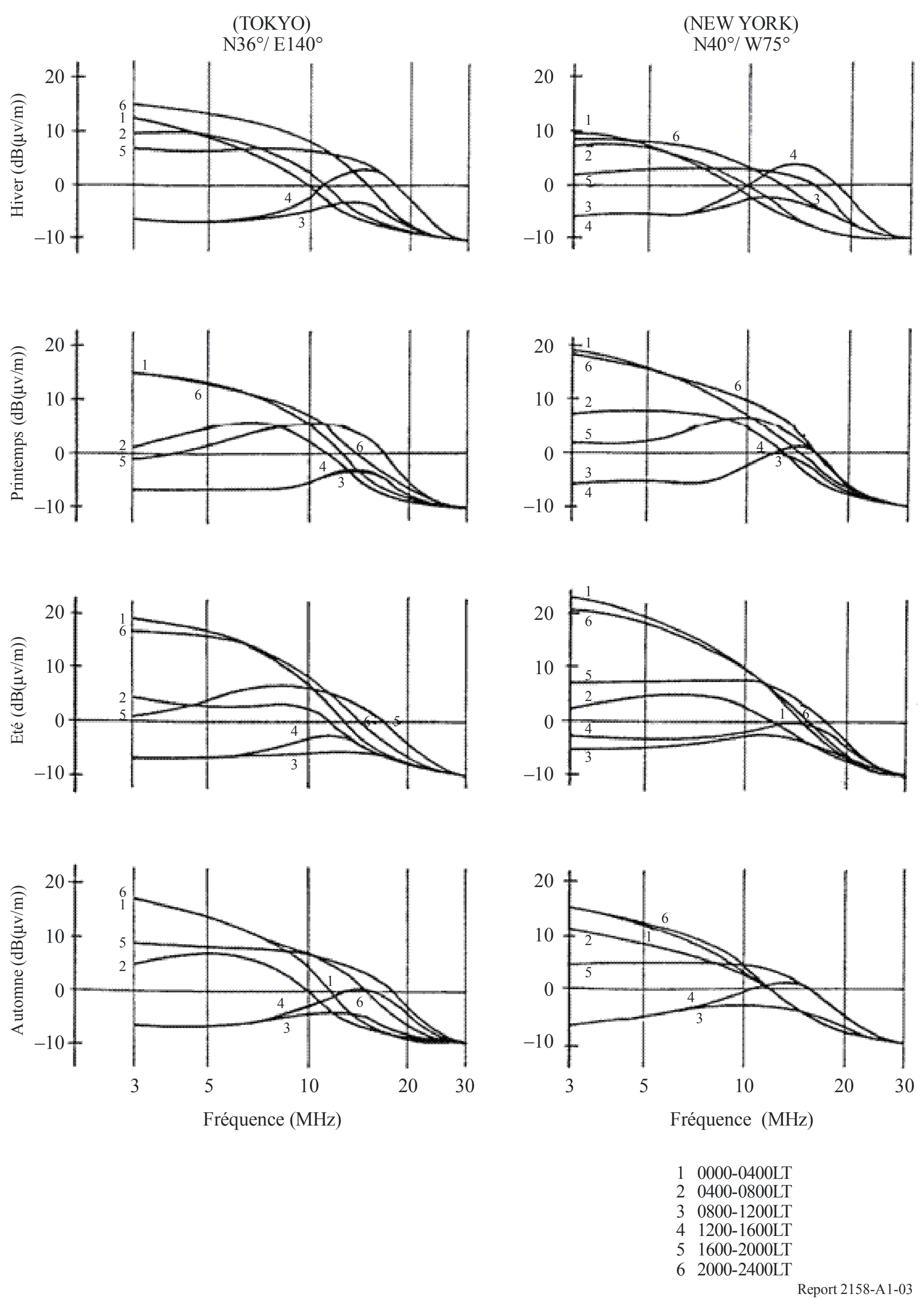
Formules traduisant le niveau de bruit atmosphérique: valeurs dépassées pendant 99,5% du temps

Gamme de fréquences (MHz)	Formules
1,5-10	$F_a = 27,8 - 0,35\ (8,2 - f(\text{MHz}))^2$ dB
10-15	$F_a = 46,4 - 1,98\ f(\text{MHz})$ dB
15-20	$F_a = 66,8 - 3,34\ f(\text{MHz})$ dB
20-30	0

Ces formules ont été obtenues à partir de la Recommandation UIT-R P.372 à l'aide d'un graphique représentant la situation pour laquelle les valeurs sont dépassées pendant 99,5% du temps, f étant la fréquence (MHz). Elles ont été établies uniquement pour le présent exercice. Par conséquent, bien qu'elles ne correspondent pas exactement aux courbes d'origine en certains points (là où prédominent les effets d'autres composantes), les résultats finaux sont, d'un point de vue pratique, corrects et valides.

FIGURE A1-3

Exemples de l'intensité de champ du bruit atmosphérique (Tokyo, New York)



A1.1.3.2 Mesures de bruit actualisées pour l'Europe

En juin 2002, le Groupe de travail Spectrum Engineering (SE) du Comité des communications électroniques (CCE) de la CEPT a demandé au FM22 du CCE, dans une note de liaison, de mener une campagne européenne de mesures dans les bandes de fréquences kilométriques, hectométriques et décamétriques afin d'évaluer la validité des niveaux de bruit de fond figurant dans la Recommandation UIT-R P.372-8. Cette demande visait à aider son équipe projet SE35 dans son travail technique sur la compatibilité entre les systèmes de transmission par câble et les services radioélectriques.

La Recommandation UIT-R P.372 9 a été très récemment révisée (en 2007), mais les chiffres relatifs au bruit de fond n'ont pas été modifiés. Or les résultats concernant le bruit artificiel reposent toujours sur une analyse réalisée dans les années 70, principalement à partir de mesures effectuées aux Etats-Unis. De plus, selon plusieurs études, le bruit de fond aurait légèrement augmenté. Il est donc essentiel de disposer de valeurs exactes et actualisées du niveau de bruit de fond.

A cet égard, en novembre 2002, le FM22 a organisé une campagne de mesures en Europe, sur la base des propositions du SE35 en matière de méthode et de procédures de mesure, comme indiqué dans la note de liaison. Des membres du Groupe de travail PT SE35 et plusieurs organisations, notamment l'OTAN et la European Radio amateur Association (association européenne des radioamateurs), ont affiché leur volonté de contribuer à l'étude. Il est clairement apparu, au vu de l'ambiguïté des résultats, que l'objectif initial de la campagne, à savoir réunir des résultats susceptibles d'être comparés, était beaucoup plus difficile à atteindre que ce que l'on avait imaginé.

Aux Pays-Bas, un groupe d'experts issus de différents organes de l'armée, de l'industrie et de l'Agence de radiocommunications ainsi que des amateurs ont démarré une étude. Parallèlement, une autre étude a été menée dans le FM22.

Il est rapidement apparu que la méthode et les procédures de mesure utilisées aux Etats-Unis dans les années 70 ne pouvaient être reproduites et qu'il était nécessaire d'en développer de nouvelles et de bien les documenter.

La société britannique MASS consultants a ainsi récemment mené plusieurs études mettant en œuvre des technologies modernes pour recueillir de vastes jeux de données à des fins d'analyse statistique de qualité. Des méthodes ont en outre été développées dans le but de recueillir des mesures de bruit et de produire des données, et ce en vue d'une éventuelle modification du contenu de la Recommandation. A noter également l'élaboration d'une autre méthode visant à déterminer les caractéristiques statistiques de la composante impulsive (voir à ce propos le Rapport UIT-R P.2089). Tous ces résultats, ainsi que d'autres résultats analogues provenant d'études menées en Allemagne, ont été saisis dans la base de données que la Commission d'études 3 des radiocommunications consacre au bruit.

Les niveaux de bruit artificiel relevés dans ces deux études sont du même ordre de grandeur que ceux figurant dans la Recommandation, ce qui laisse penser qu'il n'y a pas eu de changement majeur ces trente dernières années, la consommation accrue d'électricité ayant peut-être été compensée par l'amélioration des techniques de suppression. Cela étant, les données sont encore insuffisantes pour envisager, en toute confiance, une révision de la Recommandation.

La Recommandation UIT-R P.372 fournit des estimations des niveaux de bruit radioélectrique artificiel, atmosphérique et cosmique sur l'ensemble du spectre. Dans la bande des fréquences décamétriques, c'est le bruit artificiel qui prédomine dans la plupart des situations, mais il arrive que sur certains sites radio – ceux présentant un faible niveau de bruit par exemple –, le bruit atmosphérique et le bruit cosmique constituent le facteur de bruit limitant. Le niveau de bruit causé par des sources naturelles ne devrait pas avoir changé depuis la publication des modèles figurant dans la Recommandation UIT-R P.372. Quant au bruit artificiel, il importe de rappeler qu'il peut évoluer en fonction de l'activité industrielle.

A1.2 Mécanismes de propagation

A1.2.1 Propagation en champ proche et propagation par l'onde de sol

Dans le cas des CPL, la multiplicité des sources de rayonnement que constituent les lignes électriques nécessite d'évaluer le rayonnement à partir d'une portion générique du réseau global reliée à un point d'injection. La mise en œuvre d'un ensemble de modélisation tel que le code électromagnétique numérique (NEC) permet d'effectuer des évaluations à des distances inférieures à 1 km au minimum. Pour évaluer les niveaux de puissance rayonnée à des distances supérieures ou égales à 1 km, là où apparaît la propagation par l'onde de sol, les niveaux d'intensité du champ peuvent être calculés à l'aide des courbes figurant dans la Recommandation UIT-R P.368[15], pour des fréquences inférieures ou égales à 30 MHz. GRWAVE peut être utilisé sur l'ensemble de la gamme de fréquences qui nous occupe, jusqu'à 80 MHz au minimum. Pour obtenir une copie de GRWAVE, le lecteur pourra se reporter à la page «Logiciels» de la Commission d'études 3 des radiocommunications[16].

Pour des distances supérieures, en visibilité directe, au-dessous ou au-dessus de la ligne électrique, on pourra se reporter à la Recommandation UIT-R P.525, et pour des fréquences supérieures, à la Recommandation UIT-R P.1546.

A1.2.2 Propagation par l'onde ionosphérique

Dans la bande des fréquences décamétriques, l'ionosphère joue un rôle important, en cela qu'elle permet la propagation de signaux relativement faibles sur de longues distances, surtout par réflexion et réfraction dans les régions de haute altitude: couches E et F. Par ailleurs, un phénomène d'absorption importante peut apparaître, en particulier dans la région D, partie inférieure de l'ionosphère. Aussi le mode de propagation par l'onde ionosphérique peut-il tout à la fois renforcer et affaiblir les signaux reçus à de grandes distances. En outre, l'ionisation étant commandée par le Soleil, l'ionosphère présente des variations dans la journée et selon les saisons, en fonction de l'activité solaire.

Le Groupe de travail 3L de l'UIT-R a estimé que les dispositions fortement géométriques des lignes électriques transportant des CPL étaient globalement susceptibles de produire des rayonnements plus importants et plus directionnels que des configurations plus aléatoires.

Il est parfois nécessaire d'évaluer la puissance totale rayonnée par l'ensemble de toutes les portions génériques dans une zone donnée, une ville par exemple. Le ou les effets cumulatifs éventuels de nombreux systèmes CPL de type *Access* pourraient contribuer à la propagation par l'onde ionosphérique, ou en être à l'origine, propagation qui peut, selon la fréquence, atteindre de longues distances. Une annexe du présent document propose une méthodologie en vue d'une étude complémentaire visant à évaluer les effets de la propagation par l'onde ionosphérique d'émissions cumulatives provenant d'un grand nombre de sources CPL.

A partir des hypothèses retenues dans les études décrites dans le présent Rapport et de renseignements complémentaires examinés, on peut utiliser les diverses hypothèses suivantes pour le calcul des effets cumulatifs sur la propagation par l'onde ionosphérique.

---

[15] Disponible à l'adresse http://www.itu.int/rec/R-REC-P.368/recommendation.asp?lang=en&parent=R-REC-P.368-9-200702-I.

[16] http://www.itu.int/oth/R0A0400000F/fr.

Hypothèses à utiliser pour le calcul des effets cumulatifs sur la propagation par l'onde ionosphérique	
p.i.r.e. par modem CPL(1)	–74 dBm/Hz à –103 dBm/Hz
Modems CPL par ménage	2 à 4
Facteur d'utilisation (fraction de temps pendant lequel chaque modem émet)	0,005 à 0,50
Pénétration du marché (nombre de modems CPL divisé par le nombre de ménages)	0,02 à 0,30

(1) Pour certaines études, on a utilisé des valeurs mesurées de la p.i.r.e. pouvant atteindre –74 dBm/Hz, tandis que pour d'autres, on a utilisé des niveaux de puissance rayonnée de –103 dBm/Hz calculés à partir des niveaux de puissance injectée et d'un facteur de conversion théorique.

A1.2.3 Exemples de calculs et d'études relatifs à la propagation

La liste suivante fournit des exemples de travaux portant sur plusieurs modes de propagation des ondes radioélectriques, qui s'appliquent au contexte de la présente étude:

1) Rapport 04-413 de la NTIA – Potential interference from broadband over power line (BPL) systems to Federal Government Communications at 1.7-80 MHz – Phase 1 Study (risques de brouillages causés par des systèmes CPL aux FCC dans la gamme de fréquences 1,7-80 MHz – Etude de phase 1). Disponible à l'adresse http//www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl.
2) Recommandation UIT-R P.368 – Courbes de propagation de l'onde de sol entre 10 kHz et 30 MHZ.
3) Recommandation UIT-R P.834 – Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques et Recommandation UIT-R P.1546 – Méthode de prévision de la propagation point à zone pour les services de Terre entre 30 et 3 000 MHz.
4) Recommandation UIT-R P.533 – Méthode pour la prévision de la propagation des ondes décamétriques.

Annexe 2

Analyse des brouillages potentiels

A2 Analyse des brouillages potentiels

A2.1 Analyse de modélisation applicable au service de radioastronomie (SRA)

«Le risque de brouillages préjudiciables causés par des systèmes CPL dépend fortement de facteurs tels que les caractéristiques du réseau électrique local ou la conception et la topologie d'un système CPL donné. Etant donné que ces facteurs varient considérablement d'un endroit à l'autre, les conclusions tirées de l'étude d'un système donné ne peuvent raisonnablement pas s'appliquer à des configurations différentes de celles utilisées pour l'étude en question. Il importe donc que les administrations veillent tout particulièrement à prendre des décisions de réglementation uniquement sur la base d'analyses qui reflètent précisément la situation dans leur pays.»

Les systèmes CPL injectent de l'énergie radiofréquence à large bande dans un système de conducteurs, qui est, par sa nature même, dissymétrique et se présente sous de nombreuses configurations, à l'échelle mondiale mais aussi au sein d'une même administration. Plusieurs campagnes de mesure ont clairement montré que les rayonnements proviennent à la fois de sources ponctuelles et des lignes d'alimentation. La multiplicité des sources de rayonnement que constituent les lignes électriques nécessite d'évaluer le rayonnement à partir d'une portion générique du réseau global reliée à un point d'injection.

La mise en œuvre d'un ensemble de modélisation tel que le code électromagnétique numérique (NEC) permet d'évaluer les rayonnements à des distances inférieures à 1 km au minimum. Pour évaluer les niveaux de puissance rayonnée à des distances supérieures ou égales à 1 km, là où apparaît la propagation par l'onde de sol, les niveaux d'intensité du champ peuvent être calculés à l'aide des courbes figurant dans la Recommandation UIT-R P.368[17], pour des fréquences inférieures ou égales à 30 MHz. GRWAVE peut être utilisé sur l'ensemble de la gamme de fréquences qui nous occupe, jusqu'à 80 MHz au minimum. Pour obtenir une copie de GRWAVE, le lecteur pourra se reporter à la page «Logiciels» de la Commission d'études 3[18].

Il est parfois nécessaire d'évaluer la puissance totale rayonnée par l'ensemble de toutes les portions génériques dans une zone donnée, une ville par exemple. Il est également possible que les lignes électriques soient à l'origine d'une composante ionosphérique. Dans ce cas, les intensités du champ ionosphérique peuvent être évaluées à l'aide de la Recommandation UIT-R P.533[19].

Point important: lors de l'élaboration des critères applicables aux systèmes CPL, il est nécessaire de mesurer à la fois le champ E et le champ H, étant donné que la relation entre ces deux composantes dans le champ proche de ces sources de rayonnement n'est pas connue.

A2.1.1 Utilisations des bandes d'ondes décamétriques par le SRA

Les bandes de fréquences protégées 13,36-13,41 et 25,55-25,67 MHz sont utilisées de façon intensive par les radioastronomes pour observer les ondes électromagnétiques émises par le Soleil, par Jupiter, par des pulsars et par de nombreux autres types d'objets célestes. Ces émissions sont principalement le résultat de l'émission synchrotron et de l'interaction ondes-particules produites par des électrons accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière. Elles sont distribuées de façon continue sur une gamme de fréquences relativement large.

---

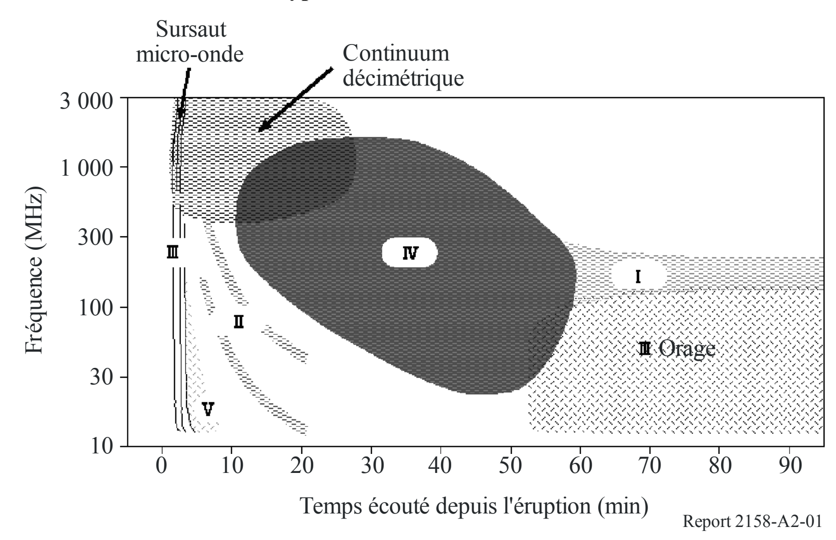
[17] http://www.itu.int/rec/R-REC-P.368/fr.

[18] http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=documents&rlink=rsg3&lang=fr.

[19] http://www.itu.int/rec/R-REC-P.533/fr.

FIGURE A2-1

Types de sursaut dus au Soleil



Le Soleil produit toutes sortes de rayonnements radioélectriques. Ceux qui concernent la bande des fréquences décamétriques sont les rayonnements produits par des éruptions et d'autres phénomènes transitoires. La Fig. A2-1[20] en présente les spécificités et la classification. Ces rayonnements, dont les caractéristiques sont diverses et variées, se produisent sur une large gamme de fréquences, qui s'étend au minimum de 10 MHz à 3 GHz. Si les sursauts et les orages de type III sont les émissions radioélectriques solaires les plus fréquemment observées dans la gamme des fréquences décamétriques, tous les types sont susceptibles de se produire avec une probabilité plus ou moins grande. Certains sursauts d'émissions radioélectriques solaires sont suffisamment puissants pour interrompre des télécommunications radioélectriques de Terre. Etant donné que de nombreuses applications critiques, notamment les communications aéronautiques à longue distance, reposent sur les ondes décamétriques, il est essentiel de pouvoir prévoir les dégradations des conditions de communication causées par l'activité solaire dans cette bande de fréquences. Pour répondre à ces besoins, le NICT (National Institute of Information and Communications Technology/institut national des technologies de l'information et de la communication) du Japon produit des «prévisions météorologiques spatiales» depuis de nombreuses années.

En outre, c'est dans les bandes de fréquences décamétriques et métriques/décimétriques que l'on peut étudier de façon optimale certains aspects de l'évolution de l'univers juste après le big-bang, auxquels on porte aujourd'hui un grand intérêt. De nouveaux radiotélescopes permettant d'explorer cette région du spectre, tels que le LOFAR (réseau basses fréquences), le LWA (réseau à grandes longueurs d'onde) et le SKA (réseau d'un kilomètre carré), sont actuellement en projet.

A2.1.2 Espacement entre une antenne de radioastronomie et un système CPL dans la région décamétrique

A2.1.2.1 Système CPL utilisé pour l'étude

Plusieurs pays ont proposé d'utiliser un système CPL hautes fréquences exploitant la bande 2-30 MHz. Etant donné que les lignes électriques ne sont pas conçues pour prendre en charge les applications de télécommunication dans la bande des fréquences décamétriques, les transmissions subissent un affaiblissement considérable. Pour compenser cet affaiblissement, les systèmes

[20] http://hiraiso.crl.go.jp/.

proposés utilisent des puissances de transmission élevées (par exemple –50 dBm/Hz, valeur utilisée dans la présente étude). Par conséquent, les lignes électriques transportant des signaux CPL émettent des rayonnements de forte intensité dans la bande des fréquences décamétriques.

Le gain de l'antenne constituée par la ligne électrique est fixé par hypothèse à –20 dBi[21].

A2.1.2.2 Calculs

Il serait très difficile d'établir une formule, applicable de façon générale, pour calculer la puissance reçue par une antenne de radiotélescope provenant d'un signal émis par un système CPL. Il convient en effet de prendre en compte la configuration géométrique du ou des câbles transportant les signaux ainsi que les distances qui les séparent de structures conductrices et diélectriques. De plus, en prenant la longueur d'onde comme distance de comparaison, on peut affirmer que l'«antenne» se trouve parfois «à proximité» du sol. Par ailleurs, aux fréquences inférieures à 30 MHz environ, l'ionosphère peut largement contribuer à la propagation des émissions.

Equation permettant de calculer la puissance reçue par une antenne du SRA

La puissance reçue par une antenne de radioastronomie est donnée par la formule suivante:

$$P_r = P_t - L_{bf} + G_r \tag{A2-1}$$

où:

- P_r: puissance reçue par l'antenne de radioastronomie (dBW)
- P_t: puissance transmise à une distance de 30 m de l'émetteur (dBW)
- G_r: gain de l'antenne de radioastronomie en direction de l'émetteur (dBi)
- L_{bf}: affaiblissement de propagation au-delà d'une distance de 30 m par rapport à l'émetteur (dB).

Le gain de l'antenne de radioastronomie (0 dBi) et le gain de la ligne électrique (−20 dBi) étant posés, il reste à évaluer P_t et L_{bf} pour calculer la puissance reçue par l'antenne de radioastronomie. Le calcul de P_t présente des difficultés. Pour évaluer L_{bf}, il faut en effet tenir compte de l'affaiblissement sur le trajet géométrique, mais aussi de nombreux autres facteurs, notamment le rôle que jouent les structures conductrices et diélectriques situées à proximité, les interférences d'ondes et la propagation ionosphérique.

Nous considérons une distance de 30 m. Le calcul qui suit est donc effectué pour cette distance. Nous examinons ensuite l'application du modèle à d'autres distances.

Calcul de la puissance transmise à une distance de 30 m de l'antenne d'émission (dBW)

Il est possible de calculer l'intensité du champ transmis à une distance de 30 m, E, par un émetteur en utilisant l'équation (1) du § 2 de la Recommandation UIT-R P.525 comme suit:

$$E = \frac{\sqrt{30 G_t P}}{d} \tag{A2-2}$$

$$= 408\ (\mu\text{V/m})\ (\text{dans la bande des 13 MHz})$$

---

[21] MUTO, K., MANABE K. et MORIMOTO T., «On the EMI / EMC issues in the Power Line Communication», 12-6, *Records of Shikoku Sections Joint Convention of Institutes of Electrical Engineering of Japan* (en japonais), 2001.

et

$$E = 633\ (\mu V/m)\ \text{(dans la bande des 25 MHz)}$$

G_t et d correspondent respectivement au gain d'antenne du système CPL (dBi) et à la distance par rapport à l'émetteur. L'intensité du champ est ensuite convertie en puissance grâce à l'équation (8) du § 4 de la Recommandation UIT-R P.525.

$$P_r = E - 20 \log f - 167{,}2 \qquad \text{(A2-3)}$$

où:

P_r: exprimée en dBW

E: dB(µV/m)

f: GHz.

La puissance reçue par une antenne de radioastronomie de 0 dBi située à 30 m de l'antenne d'émission (i.e. la ligne électrique) est donnée par la formule suivante:

$$P_r = -77{,}52\ \text{dBW (dans la bande des 13 MHz)}$$

et

$$P_r = -79{,}34\ \text{dBW (dans la bande des 25 MHz)}$$

Ces valeurs sont très supérieures aux critères de protection des récepteurs SRA. Même si ce calcul concerne une petite distance, il mérite qu'on s'y attarde car, en règle générale, les radiotélescopes sont connectés au réseau électrique. En tout état de cause, ce résultat souligne la nécessité d'éloigner les systèmes CPL le plus possible des antennes de radiotélescope.

Puissance reçue à des distances supérieures à 30 m par rapport à l'antenne d'émission

Le calcul de la puissance reçue à des distances supérieures à 30 m par rapport à l'antenne d'émission présente des difficultés. En règle générale, le calcul de la puissance reçue à de grandes distances des antennes repose sur l'hypothèse selon laquelle les échelles de grandeur caractéristiques de l'antenne sont petites en comparaison de la distance considérée ou qu'elles présentent une distribution uniforme jusqu'à l'infini, comme dans le cas d'un câble rectiligne infini. Les systèmes CPL ne satisfont généralement pas à ces hypothèses. Cela étant, le calcul en espace libre présente un intérêt à des fins d'illustration.

La Recommandation UIT-R P.525 fournit un modèle applicable à l'affaiblissement de la propagation en espace libre entre un système CPL et l'antenne d'un radiotélescope. A noter que ce modèle n'intègre pas les effets dus à l'affaiblissement atmosphérique. Cet affaiblissement étant seulement de $2{,}5 \times 10^{-2}$ dB/km (Fig. 1 de la Recommandation UIT-R P.676), il est négligé dans ce qui suit.

L'affaiblissement de la propagation en espace libre entre antennes isotropes, L_{bf}, est donné par l'équation (4) du § 2.2 de la Recommandation UIT-R P.525:

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20 \log f + 20 \log d \qquad \text{(dB)} \qquad \text{(A2-4)}$$

où:

f: fréquence (MHz)

d: distance entre l'antenne SRA et le système CPL (km).

Cela étant, il serait plus réaliste de procéder à une analyse plus déterministe, telle que celle qui est actuellement développée par le Groupe de travail 9C. Cette approche requiert notamment de modéliser les émissions reçues des lignes électriques sur des distances comprises entre 10 et 1 000 m.

Calculs des distances de séparation

Pour évaluer les distances de séparation, il convient de prendre en compte au minimum deux modes principaux de propagation: propagation sur le trajet direct, y compris les effets du relief, et propagation ionosphérique.

a) Calcul relatif au trajet direct

Nous pouvons évaluer la distance de séparation, d, à partir des éléments exposés ci-dessus.

Dans la bande des 13 MHz, L_{bf} = 107,48 dB et d = 424 km. De même, dans la bande des 25 MHz, L_{bf} = 108,66 dB et d = 253 km.

Dans ce mode de propagation, il est donc nécessaire de prévoir une distance de séparation maximale de 424 km pour protéger l'antenne de radioastronomie HF des brouillages causés par un seul système CPL. Une approche plus réaliste consisterait à envisager plusieurs émetteurs, dont certains seraient alimentés avec les mêmes signaux mais à des distances différentes de l'antenne du radiotélescope.

b) Propagation ionosphérique

Dans la bande des fréquences décamétriques, l'ionosphère joue un rôle important, en cela qu'elle permet la propagation de signaux relativement faibles sur de longues distances par réflexion et réfraction. Par ailleurs, un phénomène d'absorption peut apparaître dans la partie inférieure de l'ionosphère, à savoir la région D. Ce mode de propagation peut donc à la fois renforcer et affaiblir les signaux reçus à de grandes distances. L'ionosphère, dont les caractéristiques sont commandées par le Soleil, présente des variations dans la journée et selon les saisons. Ainsi, en fonction du niveau de l'activité solaire, l'intensité du signal reçu à de grandes distances peut varier de plus de 60 dB. En conséquence, la réception de rayonnements CPL à de grandes distances repose essentiellement sur ce mode de propagation, qui, du reste, offre parfois une couverture mondiale.

A2.1.3 Discussion

Il n'est pas facile d'évaluer de façon réaliste la probabilité de brouillage des radiotélescopes par des systèmes CPL. Cela étant, l'étude d'exemples et de cas simplifiés, tels que ceux décrits ci-après, présente, en première approche, un certain intérêt.

A2.1.3.1 Systèmes CPL multiples

C'est une évidence, les systèmes CPL s'appuient, pour communiquer, sur de nombreux modems. Il est donc indispensable d'étudier le cas d'un système comportant un nombre important de modems. Par analogie aux systèmes ADSL, dont le nombre dans maints pays dépasse déjà le million, nous prenons comme hypothèse le cas d'une zone dans laquelle sont déployés 10 000 modems CPL. Dans cette configuration, la puissance cumulée transmise par le système CPL est 10 000 fois (= 40 dB) supérieure à celle transmise par un système unique, et, même dans le cas simple d'une réception par trajet direct, la distance de séparation nécessaire pour protéger l'antenne SRA augmente de 20 dB, autrement dit, cette distance est supérieure au rayon de la Terre.

A2.1.3.2 Propagation par diffraction

La diffraction due à la surface courbe de la Terre joue un rôle important dans la propagation des ondes radioélectriques sur de longues distances. La Recommandation UIT-R P.526 fournit des orientations utiles pour le développement d'un modèle de propagation par diffraction et son annexe propose des abaques permettant d'obtenir l'affaiblissement de propagation dû à la diffraction par rapport au cas de la propagation en espace libre. La Fig. 2 de cette Recommandation fournit par exemple l'affaiblissement de diffraction dû à une Terre sphérique en fonction de la distance.

Les chiffres montrent que l'affaiblissement par diffraction est plus important pour des distances supérieures ou égales à 38 km (à 25 MHz et $k = 1$, où k représente le facteur de rayon équivalent de la Terre, tel que défini dans la Recommandation UIT-R P.310), et qu'un affaiblissement supplémentaire d'environ 20 dB se produit à une distance de 100 km. Cela étant, ces abaques semblent également indiquer que la diffraction ne produit pas d'affaiblissement supplémentaire très important si la distance de séparation reste inférieure à ces valeurs.

A2.1.3.3 Réduction des fuites des émissions provenant des systèmes CPL

On ne peut exclure que des techniques et des méthodes d'exploitation permettront de réduire de façon importante l'émission de signaux radio par les lignes électriques en deçà des niveaux considérés ici. Ces évolutions pourraient avoir des incidences majeures sur les études de compatibilité. Par exemple, en prenant pour hypothèse un trajet direct, une propagation en espace libre et une réduction des fuites des émissions de 60 dB, la distance de séparation entre l'antenne HF SRA et le système CPL tombe approximativement à 0,4 km, soit une réduction d'un facteur 1 000 environ. Dans un tel cas, il serait envisageable de déployer 10 000 modems CPL en ménageant une zone d'exclusion d'un rayon de 40 km autour de chaque télescope SRA. Si la réduction est inférieure à 60 dB, le rayon de la zone d'exclusion augmente.

A2.1.3.4 Rayonnement à des fréquences supérieures

Le système de distribution électrique n'a pas été conçu pour transporter des signaux dans la bande des fréquences décamétriques. Outre ses diverses composantes résistives et réactives, il possède quasi-assurément des caractéristiques non linéaires, celles notamment des couches d'oxyde, des revêtements des isolants et des décharges en atmosphère humide, qui produisent des harmoniques et des composantes d'intermodulation situées à des fréquences éventuellement très supérieures à la fréquence des CPL. Il conviendrait aussi de prendre en compte ces éléments. A noter cependant qu'en ce qui concerne ces aspects, les problèmes liés à la propagation sont peut-être moins complexes.

A2.1.4 Conclusions

Les modèles permettant d'évaluer les effets des rayonnements dus aux systèmes CPL dans la bande des fréquences décamétriques sur le fonctionnement des radiotélescopes sont encore à un stade embryonnaire. Pour protéger les radiotélescopes de ces rayonnements, il importe de prévoir des distances de séparation suffisantes. En appliquant un modèle de propagation simple, à trajet direct et en espace libre, on obtient une distance de protection maximale d'environ 420 km. Cela étant, ce critère est susceptible d'évoluer en raison des effets du relief au niveau local et des effets de l'ionosphère, qui, sous certaines conditions, peuvent permettre la propagation des rayonnements sur de plus grandes distances, à l'échelle d'un continent voire à l'échelle mondiale. Une évaluation plus réaliste prendrait en compte des sources multiples, dont quelques-unes au minimum seraient alimentées avec les mêmes signaux mais à des distances différentes du radiotélescope. Le développement de techniques permettant de réduire les émissions de 60 dB environ simplifierait considérablement les problèmes de compatibilité entre les CPL et les observatoires de radioastronomie, de sorte que le partage de bandes de fréquences entre les observations radioastronomiques et les systèmes CPL deviendrait plus concrètement envisageable.

Le rayonnement des produits d'intermodulation et des harmoniques dus à la non-linéarité (aux fréquences radioélectriques) des composants des lignes électriques est susceptible de produire des rayonnements à des fréquences très supérieures à la fréquence fondamentale des CPL. Il conviendrait d'étudier également ces aspects, qui peuvent certainement être décrits par des modèles de propagation simples.

Une fois les systèmes CPL déployés à grande échelle, il sera difficile de faire face aux problèmes de compatibilité avec le service de radioastronomie et les autres services de télécommunication. D'où la nécessité de réaliser des études approfondies, qui prennent notamment en compte des configurations à un seul signal et à signaux multiples ou les caractéristiques de rayonnement de grands réseaux connectés dans des environnements types d'exploitation des systèmes CPL, ainsi que la nécessité d'effectuer des mesures appropriées de systèmes et de composants réels. Il n'est pas possible, à ce stade, de présenter les aspects relatifs à la compatibilité, car des études supplémentaires s'imposent.

A2.2 Aperçu général des brouillages causés au service de radiodiffusion par les systèmes de courants porteurs en ligne (CPL)

A2.2.1 Introduction

La perspective d'un accès numérique à haut débit utilisant l'infrastructure existante du réseau électrique comme solution de remplacement à la fourniture de services Internet, notamment dans les zones rurales, suscite un fort intérêt. Les courants porteurs en ligne (CPL) utilisent les systèmes de distribution d'énergie à basse et moyenne tension pour guider la propagation de signaux radiofréquences et, ainsi, fournir un accès à des services à haut débit. Les lignes électriques n'étant pas blindées, elles sont susceptibles d'émettre des rayonnements. La présentation générale qui suit s'intéresse aux émissions provenant des dispositifs CPL sans attribution de fréquences correspondante dans le Règlement des radiocommunications.

La Commission d'études 6 des radiocommunications l'a clairement indiqué, le service de radiodiffusion doit être protégé des brouillages occasionnés par des dispositifs sans attribution de fréquences correspondante dans le Règlement des radiocommunications et qui produisent des rayonnements fondamentaux dans les bandes de fréquences attribuées au service de radiodiffusion. A cet égard, de nombreuses études ont été réalisées pour déterminer, à l'aide de simulations, les risques de brouillages de divers systèmes de radiocommunication par les CPL[22, 23]. On examine, dans ce qui suit, deux études récentes directement applicables à la radiodiffusion dans la bande des fréquences décamétriques (HF) et dans la partie inférieure de la bande des fréquences métriques (VHF).

---

22 NTIA, «Potential Interference from Broadband over Power Line (BPL) Systems to Federal Government Radiocommunications at 1.7-80 MHz», Phase I Study, Vol. I et II, Rapport 04-413 de la NTIA, avril 2004.

23 HENRY P.S., «Interference Characteristics of Broadband Power Line Communication Systems Using Aerial Medium Voltage Wires», *IEEE Comm. Mag*., p. 92-98, avril 2005.

A2.2.2 Incidence des brouillages sur la télévision dans la partie inférieure de la bande de fréquences métriques (VHF)

Caldwell et Wetmore[24] ont étudié les risques de brouillages, par des systèmes CPL, de la partie inférieure de la bande des fréquences métriques réservée à la télévision (54-88 MHz). Ils ont simulé, dans leur analyse, différents emplacements de la conurbation de Los Angeles, Californie, Etats-Unis. Les zones étudiées ont été modélisées par le programme de code électromagnétique numérique (NEC). L'une d'entre elles était un quartier résidentiel à l'ouest de Los Angeles, desservi par un système de distribution triphasé de 12 kV sans neutre à moyenne tension, dans lequel les primaires du transformateur étaient connectés entre phases. Les poteaux de distribution types (désignés 2 et 6) sont illustrés à la Fig. A2-2. La Fig. A2-3 montre la zone globale couverte par la simulation ainsi que l'emplacement des poteaux 2 et 6. Le point d'excitation CPL, E, se trouve sur le poteau 1.

FIGURE A2-2

Exemple d'un système de distribution électrique dans une zone résidentielle utilisé par le modèle CPL. Le poteau 2 est au premier plan et le poteau 6 à l'arrière-plan



Report 2158-A2-02

Le modèle NEC utilisait une fréquence unique avec un niveau de puissance en entrée de –56 dBm dans une bande attribuée à la télévision de 6 MHz. L'étude prenait en compte la modulation DSSS (étalement du spectre en séquence directe) et la modulation MROF (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence). Si l'on prend pour hypothèse une modulation MROF avec 50 porteuses régulièrement espacées, une mesure de conformité reposant sur une bande de résolution recommandée de 120 kHz fournit un résultat égal à 1/50e de la puissance de signal présente dans le canal de 6 MHz. Pour rendre compte correctement de l'augmentation cumulée de la

---

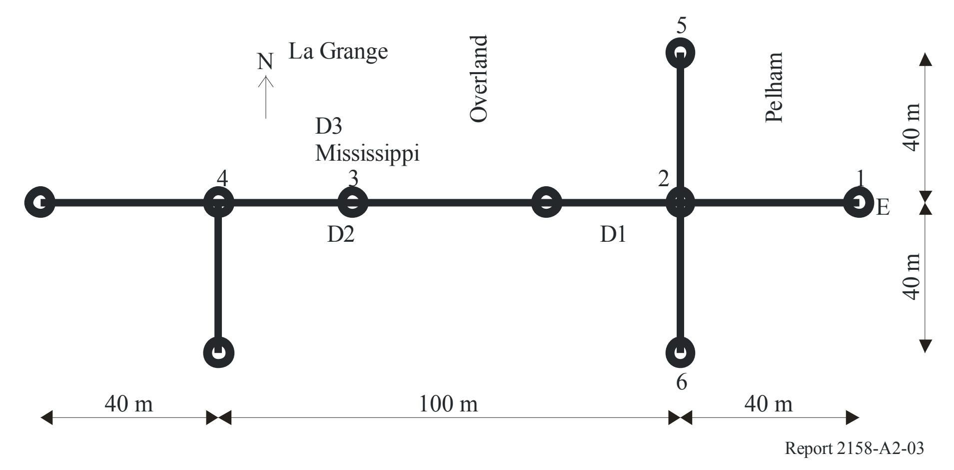
[24] WINSTON CALDWELL M. et EVANS WETMORE R., *Interference Effects into Low VHF Television Arising From Broadband Over Power Line*, Fox Technology Group, 3 février 2005. (Requête adressée le 7 février 2005 auprès de la FCC, sous référence ET Docket 03-104, par l'Association for Maximum Service Television et disponible à l'adresse www.mstv.org/docs/feb72005tech.pdf).

puissance de signal due aux multiples porteuses MROF, il conviendrait donc d'ajouter $10 \log_{10}(50) = 17$ dB.

Trois doublets demi-onde ont été placés à différents endroits à une hauteur de 9,1 m au-dessus du sol. Leur disposition a été choisie afin de simuler des antennes de réception de télévision situées sur les toits des habitations du voisinage. La Fig. A2-4 montre l'intensité de champ reçue au niveau des doublets en présence du signal CPL modulé MROF à 50 porteuses, en fonction du canal télévisé (canaux 2, 3, 4 et 5 dans la partie inférieure de la bande des fréquences métriques). L'intensité du signal (dB(μV/m)) est comparée au seuil de bruit à la limite de la zone de couverture pour un signal de télévision numérique ATSC. Ce seuil de bruit est égal à 13 dBμV/m, c'est-à-dire la différence entre l'«intensité de champ de délimitation» définie par la FCC (28 dB(μV/m)) et le rapport signal/bruit requis pour la télévision numérique ATSC (15 dB)[25]. L'intensité de champ de délimitation (*Defining field Strength*) définie par la FCC correspond à l'intensité de champ nécessaire pour couvrir la zone d'émission d'une station de télévision numérique[26]. Les facteurs de planification de la FCC imposent que le rapport signal utile/signal indésirable (D/U) pour des brouillages dans le même canal d'un signal de télévision numérique ATSC soit supérieur à +15 dB et à +23 dB aux limites de la zone de couverture. En conséquence, une intensité de signal CPL supérieure à 13 dB(μV/m) (ou 5 dB(μV/m) aux limites de la zone de couverture) en présence d'un signal de télévision numérique de 28 dB(μV/m) rend le signal de télévision inutilisable.

FIGURE A2-3

Configuration d'un système de distribution de l'électricité dans l'ouest de Los Angeles, Californie, utilisée pour évaluer les rayonnements dus aux CPL dans la bande des fréquences métriques. L'excitation CPL, *E*, s'effectue sur le poteau 1



L'intensité de champ du signal CPL dépasse également la limite fixée par la Recommandation UIT-R SM.1757 pour des brouillages causés par tout dispositif sans attribution de fréquences correspondante dans le RR (par exemple, des dispositifs à bande ultralarge). Cette Recommandation spécifie en effet que la puissance émise à 3 m par tout dispositif ne doit pas dépasser −114,2 dBm sur une largeur de bande de 6 MHz. L'intensité de champ équivalente correspond à un maximum de 2,5 dB(μV/m). Les émissions CPL dépassent largement ces limites.

---

[25] ATSC – Advanced Television Systems Committee/Comité de systèmes de télévision évolués des Etats-Unis.

[26] FCC, «Longley-Rice Methodology for Evaluating TV Coverage and Interference», *OET Bulletin n° 69*, Federal Communication Commission, 2 juillet 1997.

En outre, pour déterminer l'intensité de champ en des points discrets, l'étude inclut des courbes d'intensité de champ (µV/m) sur l'ensemble de la zone considérée. Les Figs A2-5 et A2-6 illustrent l'intensité de champ (µV/m) des émissions CPL respectivement dans les canaux télévisés 2 et 5, à 4 m au-dessus du sol, sur une zone de 2 500 m² environ. Les valeurs d'intensité de champ supérieures à 90 (µV/m) sont jugées non conformes. Les points situés à moins de 10 m du conducteur CPL ne sont pas représentés. Il convient de noter que l'émission CPL dépasse en de nombreux endroits les limites fixées par la FCC et par l'UIT-R pour la réception télévisée numérique. Cette étude montre que les signaux CPL, bien que conformes à la Partie 15 de la réglementation de la FCC, causent des brouillages importants aux signaux de télévision numérique dans la partie inférieure de la bande des fréquences métriques et rendent ces canaux inutilisables par le service de radiodiffusion.

FIGURE A2-4

Intensité de champ d'un signal CPL reçu à trois emplacements différents pour les canaux émettant dans la partie inférieure de la bande des fréquences métriques dans l'étude menée à l'ouest de Los Angeles. Le signal CPL simule une modulation MROF de 50 porteuses avec une puissance d'excitation de –56 dBm par porteuse, intégrée sur la largeur de bande TV de 6 MHz. Le tracé montre que le signal CPL dépasse largement l'intensité de champ utilisée par la FCC pour définir la zone de couverture d'une station de télévision numérique et les limites de réception

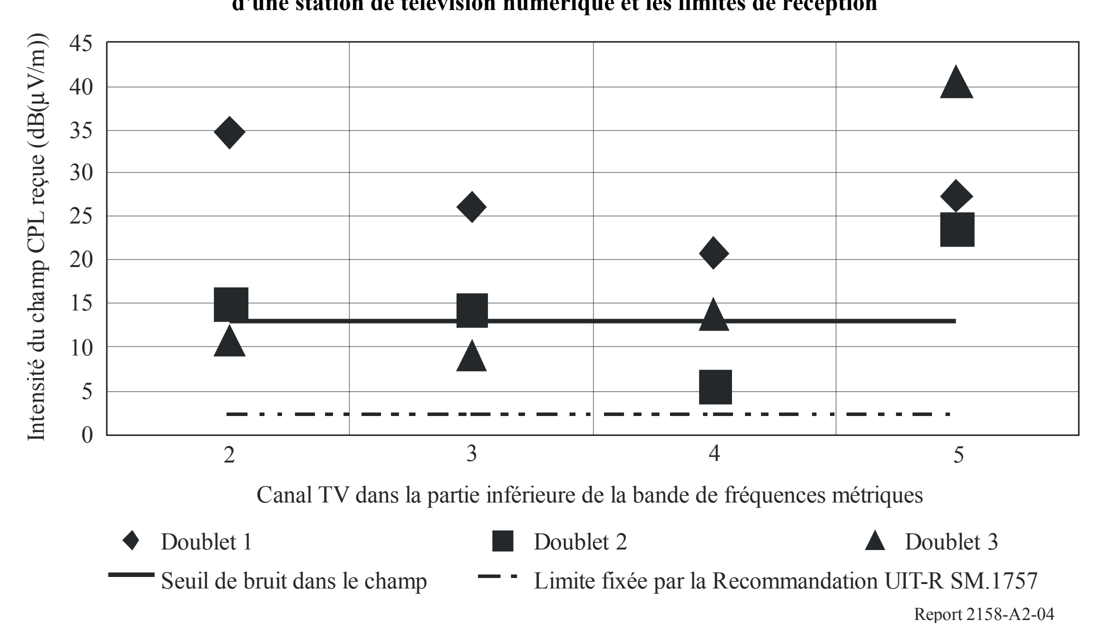
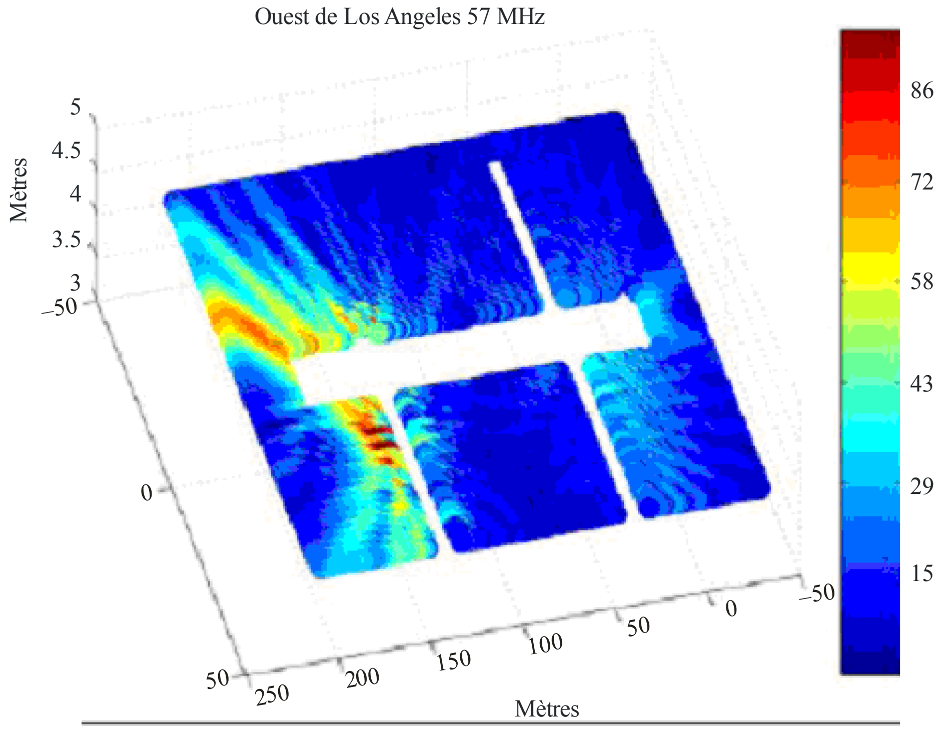


FIGURE A2-5

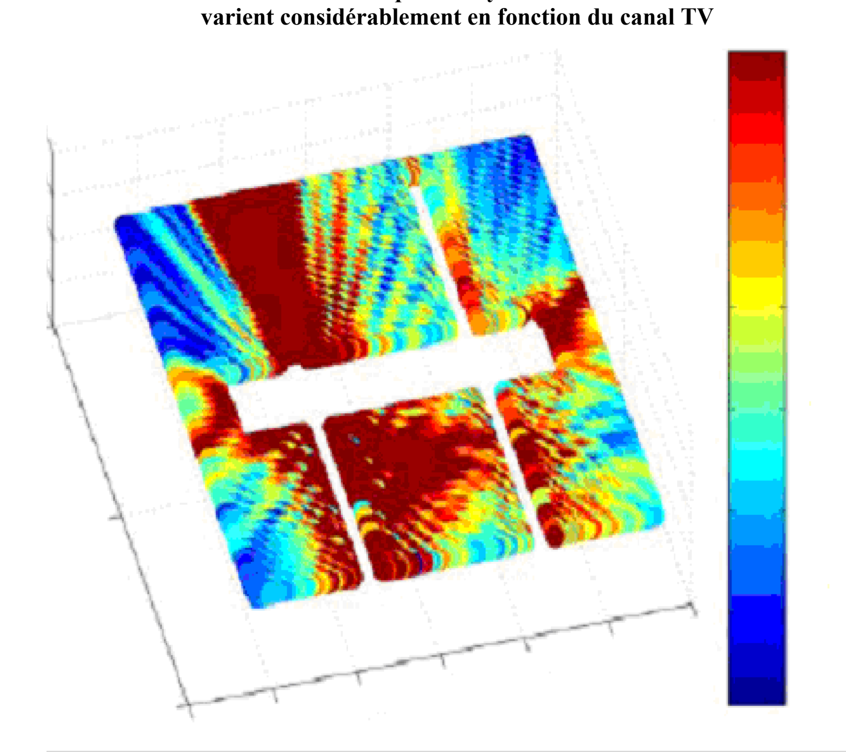
Intensité de champ des rayonnements CPL (µV/m) dans le canal TV 2 à 4 m au-dessus du sol. A noter les rayonnements de forte intensité apparaissant notamment au niveau des discontinuités de la ligne électrique



Report 2158-A2-05

FIGURE A2-6

Intensité de champ des rayonnements CPL (µV/m) dans le canal TV 5 à 4 m au-dessus du sol. A noter que les rayonnements de forte intensité varient considérablement en fonction du canal TV



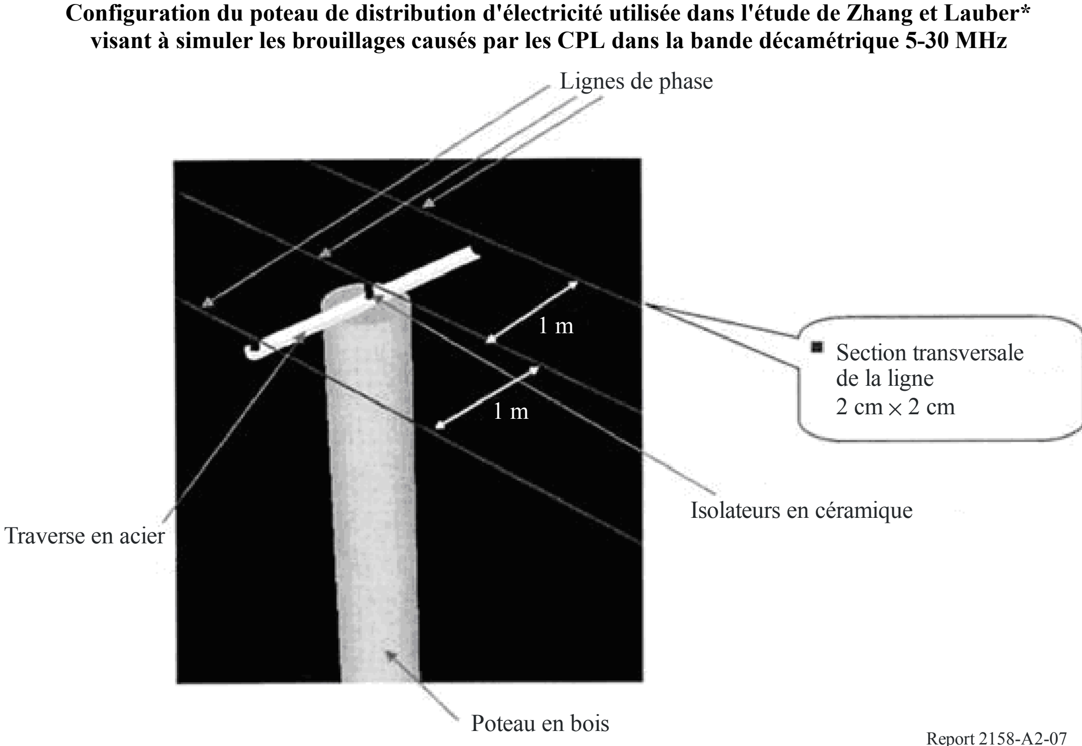
A2.2.3 Incidence des brouillages dans la bande des fréquences décamétriques

Zhang et Lauber[27] ont modélisé une situation analogue dans la bande 5-35 MHz en tenant compte, en plus, des effets des transformateurs électriques. Ils ont déterminé les caractéristiques du système CPL à partir d'une ligne triphasée de moyenne tension avec une ligne de neutre. Les lignes étaient espacées d'un mètre et situées à une hauteur de 10 m, la ligne de neutre se trouvant à 0,9 m au-dessus de la ligne de phase centrale. La configuration du poteau est illustrée à la Fig. A2-7.

Le système de distribution de l'énergie électrique est illustré à la Fig. A2-8. La ligne électrique consiste en une section rectiligne de 360 m et une seconde section rectiligne de 180 m orientée à 60° par rapport à la première. A ses deux extrémités, la ligne se termine par un transformateur dans une configuration en étoile. Dans le cas présenté ici, deux autres transformateurs étaient également disposés sur la ligne. L'excitation CPL était injectée à 60 m de l'extrémité de la ligne à l'aide d'une source gaussienne à large bande avec une densité spectrale de puissance de –50 dBm/Hz. Zhang et Lauber montrent que l'introduction de la réactance inductive des transformateurs accroît les discontinuités d'impédance et donc les résonances et les rayonnements non désirés produits par les lignes électriques. Leurs résultats confirment les observations de Caldwell et Wetmore susmentionnées, à savoir que les rayonnements sont plus importants au niveau des discontinuités du réseau de distribution.

FIGURE A2-7

Configuration du poteau de distribution d'électricité utilisée dans l'étude de Zhang et Lauber*
visant à simuler les brouillages causés par les CPL dans la bande décamétrique 5-30 MHz



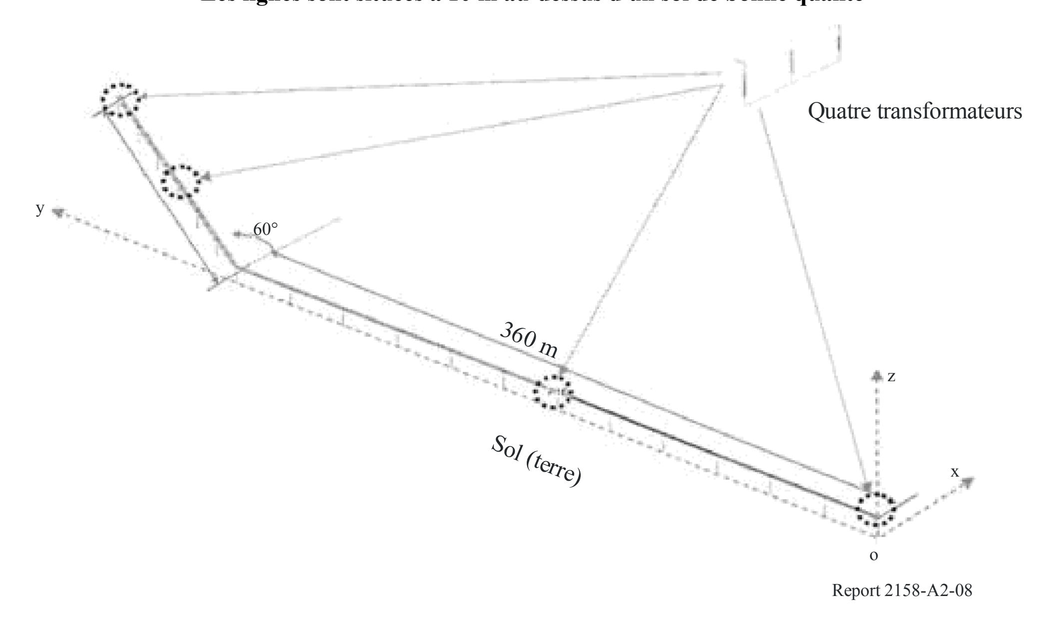
* ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of Interference Potential of PLT Systems». *Proc. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLT)*, Orlando, Floride, Etats-Unis d'Amérique, 26-29 mars 2006.

---

[27] ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of Interference Potential of PLT Systems», *Proc. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLT)*, Orlando, Floride, Etats-Unis d'Amérique, 26-29 mars 2006.

FIGURE A2-8

Configuration utilisée par Zhang et Lauber* pour modéliser un réseau de distribution électrique comportant des transformateurs aux extrémités et des charges de transformateur. Les lignes sont situées à 10 m au-dessus d'un sol de bonne qualité



Report 2158-A2-08

* ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of Interference Potential of PLT Systems». *Proc. 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLT)*, Orlando, Floride, Etats-Unis d'Amérique, 26-29 mars 2006.

A l'aide de ce modèle, Zhang et Lauber[28] ont simulé des points de mesure à des distances multiples d'un quart de longueur d'onde par rapport au point d'excitation. Des mesures en polarisation verticale ont été effectuées à une hauteur de 2 m au-dessus du niveau du sol et à une distance horizontale de 10 m par rapport au conducteur le plus proche. Les résultats sont diminués de 3 dB pour prendre en compte la différence entre les valeurs de crête de la simulation et les valeurs limites de la FCC, qui sont spécifiées pour un détecteur de quasi-crête[29]. Les Figs A2-9 et A2-10 montrent les résultats de la simulation en fonction de la distance par rapport au point d'excitation pour les gammes de fréquences 5-20 MHz et 25-35 MHz respectivement. A noter que la ligne électrique présente des ondes stationnaires. En présence de discontinuités d'impédance, ces ondes stationnaires génèrent des résonances importantes, qui apparaissent à plusieurs fréquences et en différents points de la ligne électrique. La Fig. A2-11 illustre l'effet net de ces résonances et montre que les CPL produisent, le long de la ligne, des rayonnements très supérieurs aux limites fixées par la FCC.

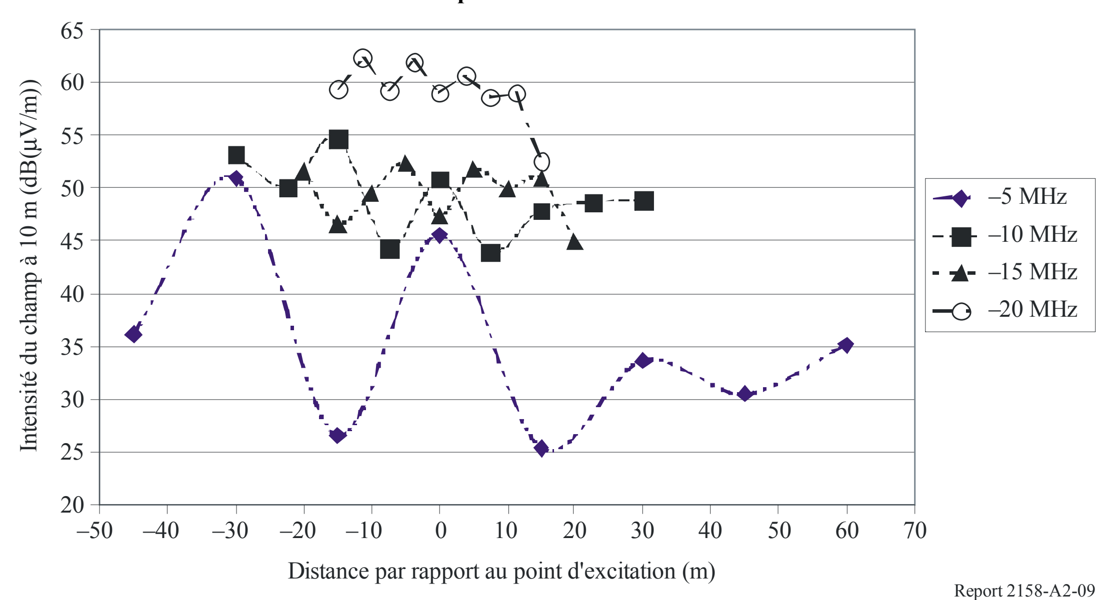
---

[28] ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of the Interference Potential of Power Line Communication Systems», *CRC Technical Report Phase II*, VWS-TM-05-06-02, Ottawa, Canada, janvier 2006.

[29] FCC Report and Order, *In the Matter of Amendment of Part 15 regarding new requirements and measurement guidelines for Access Broadband over Power Line (BPL) Communication Systems,* ordonnance adoptée le 14 octobre 2004 et publiée le 28 octobre 2004, Federal Communications Commission, Etats-Unis d'Amérique, 2004.

FIGURE A2-9

Intensité de champ des rayonnements CPL adjacents à une ligne de distribution électrique. Courbes tirées des simulations de Zhang et Lauber* pour des fréquences comprises entre 5 et 20 MHz

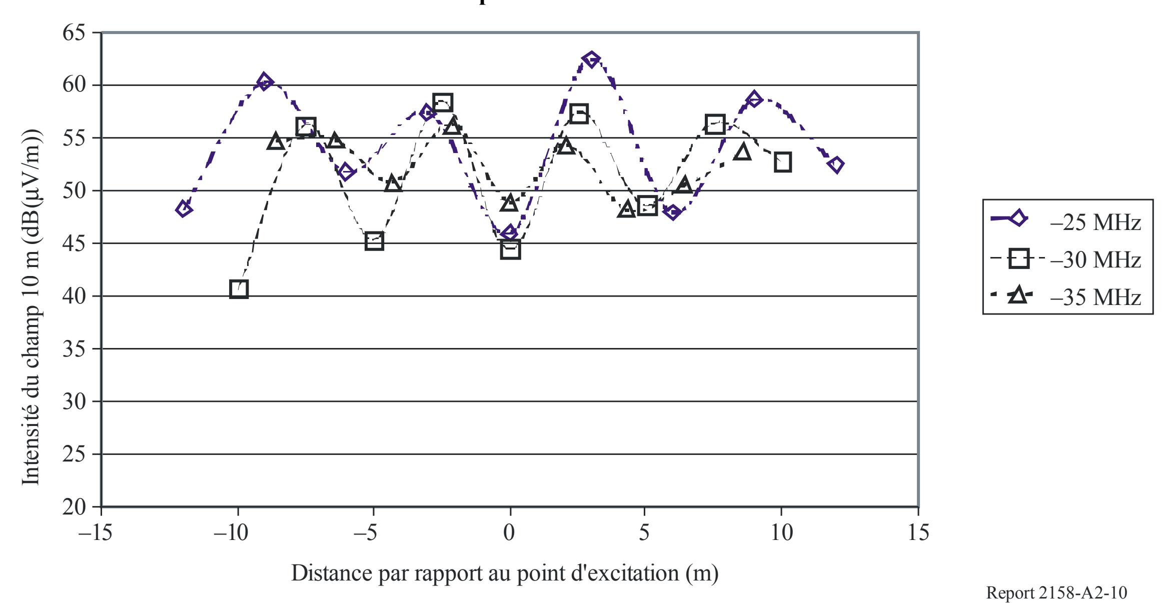


Report 2158-A2-09

* ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of the Interference Potential of Power Line Communication Systems», *CRC Technical Report Phase II*, VWS-TM-05-06-02, Ottawa, Canada, janvier 2006.

FIGURE A2-10

Intensité de champ des rayonnements CPL adjacents à une ligne de distribution électrique. Courbes tirées des simulations de Zhang et Lauber* pour des fréquences comprises entre 25 et 30 MHz

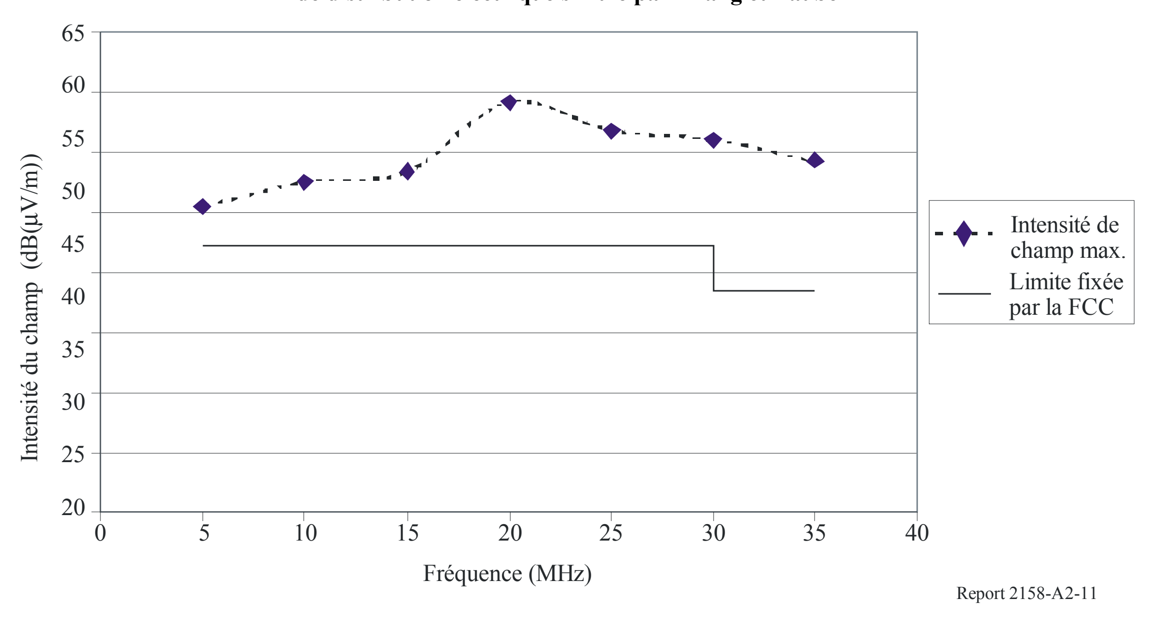


Report 2158-A2-10

* M. ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of the Interference Potential of Power Line Communication Systems», *CRC Technical Report Phase II*, VWS-TM-05-06-02, Ottawa, Canada, janvier 2006.

FIGURE A2-11

Intensité de champ maximale des rayonnements CPL produits le long du réseau de distribution électrique simulé par Zhang et Lauber*



* ZHANG M. et LAUBER W., «Evaluation of the Interference Potential of Power Line Communication Systems», *CRC Technical Report Phase II*, VWS-TM-05-06-02, Ottawa, Canada, janvier 2006.

A2.2.4 Résumé et conclusions

Il ne fait aucun doute que le service de radiodiffusion et sa portée opérationnelle sont limités par le bruit de fond de l'équipement de réception. Les services de radiodiffusion sont tout particulièrement sensibles au bruit produit au voisinage de l'antenne de réception. Cet aperçu général a permis d'illustrer les problèmes que posent les CPL à cet égard et la nécessité de limiter l'exploitation des dispositifs CPL dans les bandes de fréquences attribuées au service de radiodiffusion.

A2.3 Incidences des brouillages causés par les CPL sur le service de radiodiffusion dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz

Les informations qui suivent sont une illustration de l'incidence des brouillages causés par les CPL sur le service de radiodiffusion dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz.

Des présentations visuelles et sonores montrant les effets des CPL sur les services de radiodiffusion dans la bande des fréquences décamétriques sont disponibles à l'adresse http://www.ebu.ch/en/technical/publications/userguides/index.php. La présentation intitulée «The digital Haze» comporte une illustration audiovisuelle de ces brouillages[30].

Cette présentation montre que les brouillages causés par les dispositifs et les réseaux CPL perturbent la réception des services analogiques dans la bande des fréquences décamétriques. En outre, les brouillages à large bande émis par les réseaux CPL peuvent provoquer l'interruption

[30] Télécharger l'archive au format «zip» et décompresser tous les fichiers dans le même répertoire. Lancer la présentation avec PowerPoint en mode diaporama.

complète des services numériques qui reposent sur le système DRM[31,32]. Etant donné que, par nature, ces services sont diffusés d'un pays à un autre, les utilisateurs qui sont victimes de brouillages ne savent pas à qui adresser leurs réclamations. Par ailleurs, avec l'augmentation prévisible du nombre d'auditeurs équipés pour recevoir des émissions en DRM, ce problème devrait se poser plus fréquemment, ce qui risque de menacer le développement des nouveaux services numériques. Aussi le déploiement des systèmes CPL en dépit de cette problématique suscite-t-il de grandes inquiétudes chez les acteurs de la radiodiffusion.

La seule façon de prévenir ou tout au moins de limiter suffisamment ce problème est de définir des limites de rayonnement acceptables des réseaux CPL, à un niveau suffisamment bas pour garantir la protection du service de radiodiffusion.

A2.4 Méthode de calcul des brouillages cumulatifs causés par des systèmes CPL à la propagation par l'onde ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques

La présente section décrit quatre études portant sur les effets cumulatifs des émissions CPL sur la propagation par l'onde ionosphérique. Pour déterminer le niveau de puissance reçue cumulé, il convient, en premier lieu, de fixer par hypothèse la puissance de sortie et la densité de puissance des dispositifs et des systèmes CPL. L'effet cumulé des systèmes CPL situés en différents lieux sur un récepteur donné, à un endroit donné, peut ensuite être obtenu en additionnant les différentes puissances reçues[33]. Les quatre études sont les suivantes:

1) La première, intitulée IST-050/RTG-022 et réalisée par le Groupe opérationnel de recherche sur les brouillages, les procédures et les outils dans la bande des fréquences décamétriques de la Commission IST (technologies des systèmes d'information) de l'Organisation gouvernementale pour la recherche et la technologie, a pour objectif de calculer les effets éventuels de la généralisation, à l'échelle mondiale, des systèmes ou dispositifs CPL de type *Indoor* sur un site d'essais donné (modèle zone-point). Cette étude fournit également un exemple de calcul en prenant comme site la ville de Winnipeg, Canada.

2) La deuxième étude, réalisée par la NTIA, est une analyse des risques de brouillages dus à l'accumulation de signaux ionosphériques. L'analyse utilise un logiciel de prévision de la propagation et met en œuvre la méthode des moments appliquée à des modèles de simulation électromagnétique de lignes électriques transportant des CPL.

---

[31] Le consortium DRM (Digital Radio Mondiale), composé de 90 membres dont 36 sociétés européennes, a développé une nouvelle technologie de radiodiffusion numérique en vue d'améliorer la qualité et de renforcer les fonctionnalités de la radiodiffusion dans les bandes de fréquences kilométriques, hectométriques et décamétriques par rapport à celles offertes par les systèmes analogiques existants dans ces bandes de fréquences. Ce système est également décrit dans la Recommandation UIT-R BS.1514-1.

[32] Des présentations visuelles et sonores du système DRM sont disponibles à l'adresse http://www.drm.org/system/watchandhear.php. De nombreux radiodiffuseurs ont déjà commencé à retransmettre en direct en utilisant ce système. Leurs programmations sont disponibles à l'adresse http://www.drm.org/livebroadcast/livebroadcast.php. Des documents complets sur le DRM incluant des actualités et des manifestations régulièrement mises à jour sont disponibles à l'adresse http://www.drm.org/newsevents/pressrelease.php.

[33] A noter que dans les calculs présentés à titre d'exemple dans les études, les résultats sont directement liés aux hypothèses de départ.

3) La troisième étude, réalisée au Japon, utilise la méthode de propagation ionosphérique spécifiée dans la Recommandation UIT-R P.533 «Méthode pour la prévision de la propagation des ondes décamétriques» (modèle zone-point). Elle fournit des exemples de calcul pour une propagation à grand angle près du Japon.

4) La quatrième étude, réalisée par l'IUCAF (Comité scientifique pour l'allocation des fréquences à la radioastronomie et la recherche spatiale), comprend une étude de compatibilité concernant le service de radioastronomie dans la bande des fréquences décamétriques, qui repose sur des éléments tirés de l'étude japonaise ci-dessus.

A2.4.1 Exemple de brouillages de l'onde ionosphérique à Winnipeg, Canada – étude gouvernementale

A2.4.1.1 Introduction

La présente section décrit les résultats des travaux menés par le Groupe opérationnel de recherche de la Commission IST (technologies des systèmes d'information) de l'Organisation gouvernementale pour la recherche et la technologie sur les «brouillages, procédures et outils dans la bande des fréquences décamétriques» (IST-050/RTG-022)[34] pour répondre aux inquiétudes suscitées par les risques de brouillages radioélectriques non intentionnels causés par la multiplication des systèmes de télécommunication par ligne à large bande, tels que les CPL. Le Groupe opérationnel de recherche a commencé ses travaux en 2004 avec la participation d'un groupe d'experts international. Le rapport final, publié en 2006, est accessible au public sans limitation.

A2.4.1.2 Méthode de calcul des brouillages cumulatifs causés par des systèmes CPL sur l'onde ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques

L'étude gouvernementale propose une méthode détaillée de prévision de l'effet cumulatif des brouillages CPL dans le champ lointain (ionosphérique) au niveau d'un récepteur. A condition de connaître tous les paramètres d'entrée nécessaires, la méthode fournit des prévisions précises. Il est bien connu et facilement démontrable que la puissance cumulée d'un signal produite par un grand nombre de sources de rayonnements non intentionnels (installations CPL par exemple), reçue au niveau d'un récepteur, peut s'exprimer de la façon suivante:

$$P_{cum}(f,t) = \int_x \int_y \frac{g_{RX}(x,y,f)}{L(x,y,f,t)} P_{TX}(f) D_A(x,y) \eta_{PEN}(x,y) \eta_{USAGE}(t) \mathrm{dA} \qquad \text{(A2-5)}$$

– $P_{cum}(f, t)$ est la densité spectrale de puissance totale reçue (W/Hz), à la fréquence f et à l'instant t.

– L'intégrale est effectuée sur une zone de coordonnées géographiques (x, y).

– L'intégrale (sommation) est effectuée de façon incohérente, c'est-à-dire à partir de la puissance et non de l'amplitude.

– $g_{RX}(x, y, f)$ est la directivité de l'antenne de réception dans la direction (azimut et élévation) de signaux provenant d'un émetteur situé au point (x, y). Il importe d'utiliser la directivité et non le gain afin de pouvoir comparer le résultat aux niveaux de bruit de fond en vigueur.

– $L(x, y, f, t)$ est l'affaiblissement de transmission de référence entre le point (x, y) et le site de réception. Pour chaque fréquence, cet affaiblissement varie avec le temps (en fonction de

[34] Le rapport et l'«outil de calcul des effets cumulatifs des CPL» peuvent être téléchargés à l'adresse suivante: http://www.rta.nato.int/Pubs/RDP.asp?RDP=RTO-TR-IST-050.

l'activité solaire, de l'horaire et de l'année). Il est proposé d'utiliser l'affaiblissement de transmission médian «LOSS», tel que calculé par ICEPAC[35], programme qui prévoit la quantité d'affaiblissement du signal CPL dans des conditions de propagation *médianes* pour des paramètres d'entrée donnés.

– A noter qu'ICEPAC peut fournir une estimation directe de $\frac{L(x,y,f,t)}{g_{RX}(x,y,f)}$ à condition que les caractéristiques de l'antenne de réception soit connues et que, dans ce cas, elles soient normalisées par le rendement de l'antenne afin d'obtenir la directivité de l'antenne et non son gain. Si l'on ne connaît pas les caractéristiques de l'antenne de réception, on peut prendre pour hypothèse une antenne isotrope: $g_{RX}(x, y, f) = 1$.

– $P_{TX}(f)$ est la valeur moyenne de la densité spectrale de p.i.r.e. d'une seule installation CPL.

– $D_A(x, y)$ est la densité de population (nombre de personnes par zone géographique unitaire). Ces données démographiques (chiffres réels pour 2005 et prévisions pour 2010 et 2015) peuvent être téléchargées gratuitement depuis la base de données «Gridded population of the world»[36]. Il est recommandé de télécharger, au format BIL, les données «Population Grid», qui correspondent au nombre d'habitants dans chaque cellule de la grille pour une résolution de 0,25°. Ces données prennent implicitement en compte les différentes superficies des cellules de la grille selon les latitudes (et le fait que certaines cellules sont à cheval sur la mer et contiennent donc plus ou moins de zones de terre). Elles représentent donc directement $D_A(x, y)$dA.

– $\eta_{PEN}(x, y)$ est la pénétration du marché (installations CPL par habitant).

– $\eta_{USAGE}(t)$ est le facteur d'utilisation, c'est-à-dire la fraction moyenne de temps pendant laquelle chaque installation CPL émet. Cette valeur dépend de l'horaire et du jour de la semaine. S'agissant des installations privées par exemple, elle est en principe plus grande en dehors des périodes de travail. En ce qui concerne les systèmes CPL de type *Indoor*, la pénétration du marché correspond au nombre de modems installés et le facteur d'utilisation est moyenné sur le nombre de modems (il ne peut donc dépasser 50%, étant donné que, pour chaque modem qui émet, il y a toujours au moins un modem qui écoute).

– Pour évaluer la probabilité de l'effet cumulatif des brouillages causés par les CPL au niveau d'un site de réception, le Groupe de travail 5C recommande d'appliquer la méthode suivante:

Etape 1: Télécharger et importer les données de densité de population $D_A(x, y)$dA.

Etape 2: Evaluer $\eta_{PEN}(x, y)$ à partir d'informations disponibles concernant le marché.

---

[35] ICEPAC fait partie d'IONCAP, famille de programmes de prévision en ondes décamétriques, qui, d'après la Recommandation UIT-R F.1611, sont considérés comme des méthodes apparentées à celles contenues dans la Recommandation UIT-R P.533.

ICEPAC est disponible en téléchargement à l'adresse suivante: http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=documents&link=rsg3&lang=fr.

[36] Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University: données téléchargeables sur le site http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw.

Etape 3: Choisir plusieurs valeurs représentatives pour la fréquence d'exploitation, le moment du jour et de l'année, le nombre de taches solaires (SSN) et le niveau de l'activité géomagnétique[37]. Pour chaque combinaison de ces paramètres, exécuter les étapes restantes.

Etape 4: Lancer ICEPAC (ICEAREA_INV) pour obtenir les valeurs médianes de $\frac{L(x,y,f,t)}{g_{RX}(x,y,f)}$.

Etape 5: Evaluer $P_{TX}(f)$ et $\eta_{USAGE}(t)$ à partir des informations disponibles.

Etape 6: Evaluer numériquement l'intégrale.

Etape 7: Comparer le résultat avec le niveau de bruit de fond.

A2.4.1.3 Outil CPL cumulatif

L'interface utilisateur d'ICEAREA INVERSE n'est pas adaptée aux analyses approfondies, car elle ne permet de balayer que neuf combinaisons différentes des paramètres en entrée. Or, avec cinq paramètres en entrée (mois, heure du jour, nombre de taches solaires, Q-index et fréquence), le nombre total de combinaisons dépasse facilement 1 000, même en n'attribuant à chaque paramètre qu'un petit nombre de valeurs.

Pour résoudre ce problème, le Groupe opérationnel a développé un outil reposant sur MATLAB intitulé «Cumulative PLT tool» (ci-après «outil CPL cumulatif»), qui court-circuite l'interface utilisateur d'ICEAREA INVERSE et exécute le programme directement en mode batch pour un nombre arbitrairement grand de combinaisons de paramètres. Pour ce faire, l'outil CPL modifie les fichiers en entrée puis lance la commande DOS qui exécute le programme ICEPAC sans interface utilisateur.

Pour chaque combinaison de paramètres, l'outil CPL cumulatif exécute les étapes 1, 4, 6 et 7 de la méthode décrite au paragraphe précédent et sauvegarde les niveaux de signal CPL cumulatif résultants dans un fichier au format texte, qui peut facilement être importé sous Excel, MATLAB ou tout autre programme pour traitement ultérieur et affichage. Le fichier texte contient également les niveaux de bruit spécifiés dans la Recommandation UIT-R P.372 et le critère de protection absolue. Le Groupe opérationnel propose un critère de protection absolue de −15 dB(μV/m) par largeur de bande de 9 kHz, qui peut être converti en (dBm/Hz) par l'équation suivante dans le cas de la protection des services radioélectriques contre les brouillages produits par les CPL:

$$APR\,(f) = -15 \text{ dB}(\mu\text{V/m}) - 20 \log_{10}(f) - 10 \log_{10}(b) + 95{,}5 - 174 \text{ dBm/Hz} \qquad \text{(A2-6)}$$

où:

f: fréquence (MHz)

b: largeur de bande de la puissance de bruit (Hz).

A noter que, dans de rares cas, ICEPAC prévoit des affaiblissements le long du trajet inférieurs à 30 dB entre certaines régions et le site de réception, ce qui, de toute évidence, est physiquement impossible et résulte probablement d'un bogue logiciel. L'outil CPL cumulatif élimine toute exécution du logiciel qui prévoit un affaiblissement inférieur à 50 dB le long d'au moins un trajet et

---

[37] Paramètre en entrée «activité géomagnétique» (Q-index), qui représente l'indice d'activité géomagnétique équivalent lorsque l'indice magnétique planétaire *Kp* est connu. Q-index est compris entre 0 et 8, 0 signifiant calme, 5 actif et 8 correspondant à des conditions d'orage majeur.

signale que la donnée de prévision est manquante par le symbole «NaN» (Not a Number). Lors de l'essai du logiciel, 107 exécutions ont été étiquetées «NaN» sur un total de 7 992.

Avant de lancer l'outil, il convient d'exécuter une fois le logiciel ICEAREA INVERSE pour déterminer la grille correspondant à l'emplacement du récepteur et à l'emplacement de l'émetteur, et pour initialiser en conséquence les fichiers en entrée (que l'outil modifie par la suite). La grille correspondant à l'emplacement de l'émetteur doit être une grille Latitude/Longitude avec une résolution de 0,25° dans les deux directions et le résultat doit être sauvegardé dans le sous-répertoire «default\». L'interface utilisateur de l'outil n'est pas au format graphique (GUI), mais au format texte. A noter enfin que $P_{TX}(f)$, $\eta_{PEN}(x, y)$ et $\eta_{USAGE}(t)$ sont des paramètres d'entrée constants; autrement dit, l'outil ne prend pas en charge la variation de ces paramètres en fonction de la fréquence, de l'emplacement et du temps.

A2.4.1.4 Outil CPL cumulatif – mode d'emploi

Les fichiers programmes de l'outil CPL cumulatif peuvent être téléchargés à l'adresse http://www.rta.nato.int/Pubs/RDP.asp?RDP=RTO-TR-IST-050. L'utilisation de l'outil est décrite ci-dessous étape par étape.

Pour commencer, exécuter les instructions suivantes:

1) Lancer ICEAREA INVERSE une fois pour initialiser la grille correspondant à l'emplacement du récepteur et à l'emplacement de l'émetteur:
   a) Démarrer ICEAREA INVERSE.
   b) Choisir «Parameters» LOSS (prévision directe de l'affaiblissement le long du trajet).
   c) Choisir «Method» Auto select.
   d) Coefficients: URSI88 (aucune différence n'a été observée en utilisant les coefficients du CCIR, mais il est recommandé d'utiliser les coefficients URSI88, qui sont les plus récents).
   e) Choisir «Receiver» pour sélectionner un emplacement pour le récepteur.
   f) Choisir «Plot Center», → «Set to receiver», et sélectionner les portées en X et en Y pour la grille de l'émetteur. S'assurer que les portées en X et en Y couvrent le même nombre de degrés. A moins que les brouillages de régions lointaines ne présentent un intérêt particulier, une grille de −4 000 km à +4 000 km devrait suffire, ce qui correspond approximativement à la distance maximale pour une propagation à un seul bond limité par la courbure de la surface terrestre. (Examiner la carte pour trouver les valeurs de latitude et longitude maximale/minimale qui conviennent. S'assurer que la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale est la même pour la latitude et pour la longitude, de sorte que la résolution angulaire soit identique dans les deux directions).
   g) Choisir «Grid», sélectionner Grid Type = «1 Lat/Lon» et prendre une taille de grille de sorte que la taille de chaque cellule corresponde à 0,25 × 0,25°; autrement dit, si la portée en X et en Y couvre 70 × 70°, choisir une taille de grille de 281 × 281. Il est commode d'utiliser la grille Lat/Long en combinaison avec les données de densité de population par unité de grille.
   h) Choisir «Run» → «Map only» pour visualiser l'étendue de la grille correspondant à l'émetteur.
   i) S'assurer qu'il n'y a qu'une combinaison de paramètres sous «Groups» (les valeurs de paramètres indiquées sont sans importance).
   j) Choisir «System parameters», Min. angle (angle minimal) = 0,1°, multipath power tolerance (tolérance de puissance en propagation par trajets multiples) = 10 dB,

maximum tolerable time delay (temps de propagation maximal acceptable) = 15 ms (les deux dernières valeurs sont augmentées par rapport aux valeurs par défaut de façon à tenir compte des différents trajets de propagation). Les autres paramètres systèmes, y compris la puissance de l'émetteur, sont sans objet dans le cas de la seule prévision de l'affaiblissement le long du trajet.

k) Choisir «Fprob» Keep default values (conserver les valeurs par défaut).

l) Choisir «TX antenna» default/isotrope[38].

m) Choisir «RX antenna» default/isotrope, ou saisir des informations concernant l'antenne du site de réception si nécessaire.

n) Choisir «Run» → «Calculate» → «Save/Calculate/Screen».

o) Lorsque le logiciel demande le nom du fichier d'entrée, parcourir les répertoires jusqu'au sous-répertoire «default» et saisir un nom de fichier judicieux.

p) Le programme devrait maintenant effectuer ses calculs et afficher une courbe à l'écran. Fermer le programme et toutes les fenêtres qu'il a ouvertes. Les fichiers produits par le programme seront utilisés par l'outil CPL cumulatif.

NOTE 1 – si une seule option est sélectionnée sous «Groups», exécuter «Save/Calculate/Screen». Le résultat sera affiché à l'écran sous forme d'une carte et sauvegardé dans un fichier nommé xxx.ig1. Si plusieurs options sont sélectionnées sous «Groups», exécuter «Save/Calculate». Les résultats seront sauvegardés dans des fichiers nommés xxx.ig1, xxx.ig2, xxx.ig3, etc. Les fichiers de sortie xxx.igx sont des fichiers au format texte, qui peuvent être utilisés pour un traitement ultérieur en vue d'évaluer les effets cumulatifs.

2) Lancer MATLAB, aller dans le répertoire d'installation et saisir «cumulative_plt_tool» pour démarrer l'outil. Suivre les instructions à l'écran.

a) Le programme a été conçu pour résister, dans une certaine mesure, aux erreurs de saisie: en cas de saisie erronée, l'outil demande en théorie une seconde saisie.

b) Les différentes options de l'interface utilisateur au format texte sont illustrées à la Fig. A2-12.

c) Le programme demande de choisir le fichier contenant les données relatives à la population: à noter que, par exemple, le fichier nommé glp05ag15.bil correspond aux données de 2005 et le fichier glp10ag15.bil à celles de 2010 (autrement dit, les deux chiffres situés au milieu du nom du fichier correspondent à l'année).

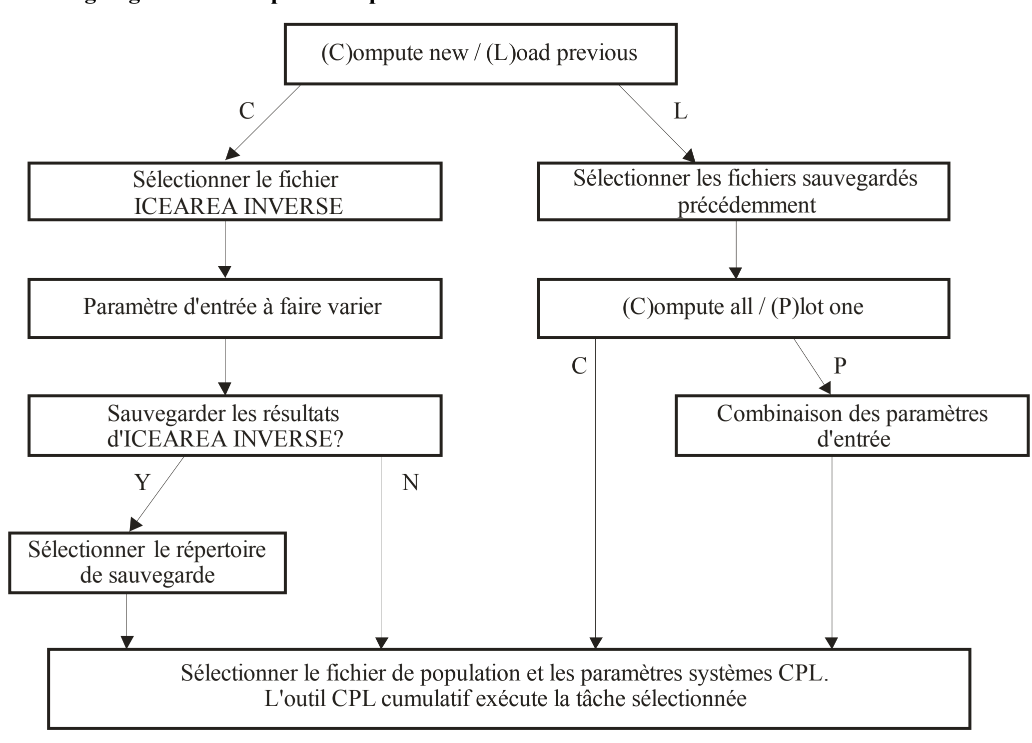
d) Attention: l'exécution du programme pour un grand nombre de combinaisons de paramètres requiert un temps de traitement important et beaucoup d'espace disque.

---

[38] Antenne isotrope: antenne équidirective.

FIGURE A2-12

Organigramme des options disponibles dans l'interface utilisateur de l'outil CPL cumulatif



L'outil comporte trois modes opératoires:

1) «Compute new»: l'outil s'exécute pour plusieurs combinaisons de paramètres. Pour chaque combinaison, il effectue les étapes ci-dessous:
   a) Appel de ICEAREA INVERSE.
   b) Stockage des fichiers résultats produits par ICEAREA INVERSE en vue d'un usage ultérieur (facultatif).
   c) Calcul du niveau de signal cumulatif CPL et comparaison avec les courbes de bruit de l'UIT-R et avec le critère de protection absolue.
   d) Enregistrement des résultats dans un fichier au format texte.
2) «Load previous/Compute all»: l'outil analyse les fichiers générés précédemment par ICEAREA INVERSE dans le mode 1 et, pour chaque fichier, exécute les actions suivantes:
   a) Chargement en mémoire du fichier résultat d'ICEAREA INVERSE.
   b) Calcul du niveau de signal cumulatif CPL et comparaison avec les courbes de bruit de l'UIT-R et avec le critère de protection absolue.
   c) Enregistrement des résultats dans un fichier au format texte.
3) «Load previous/Plot one»: l'outil demande à l'utilisateur de choisir l'une des combinaisons de paramètres précédemment calculées et génère une figure/carte du type de celle présentée à la Fig. A2-13.

L'exécution de l'outil produit les fichiers suivants:

1) «xxx_summary.txt»: fichier au format texte contenant le niveau de signal CPL cumulatif évalué, comparé aux courbes de bruit de fond pour chaque combinaison de paramètres.

2) «xxx_swept_parameters.mat»: fichier de données MATLAB contenant les informations qui ont permis de simuler les combinaisons de paramètres (à utiliser dans le mode «Load previous»).

3) (Facultatif) «xxx_00001.ig1», «xxx_00002.ig1», etc.: résultats produits par ICEAREA INVERSE (un fichier par combinaison de paramètres).

A2.4.1.5 Calcul du bruit radioélectrique produit par les systèmes CPL dans la bande des fréquences décamétriques

La présente section décrit un exemple d'utilisation de l'outil CPL cumulatif pour évaluer les probabilités de brouillage en un emplacement de réception fictif. Pour faciliter les références, l'emplacement choisi est une ville. Un exemple de paramètres en entrée est fourni au § A2.1.

Exemple d'emplacement du récepteur: Winnipeg, Canada

Cet exemple concerne un récepteur fictif situé à Winnipeg au Canada (49,53N et 97,09W). Compte tenu du fait que Winnipeg est une ville de la province du Manitoba, zone rurale du Canada dont la densité de population est inférieure à deux personnes par km^2, on a estimé qu'il était judicieux, pour les calculs, de prendre le niveau de bruit «zone rurale calme» défini dans la Recommandation UIT-R P.372. A noter par ailleurs que CBC Radio-Canada utilise de nombreuses fréquences attribuées au service de radiodiffusion dans des bandes de fréquences décamétriques inférieures à 80 MHz.

L'analyse repose sur les hypothèses suivantes:

La p.i.r.e. moyenne par installation CPL est de $P_{TX} = -80$ dBm/Hz (par exemple, modems HomePlug de −50 dBm/Hz et gain équivalent de l'antenne constituée par le câble électrique de −30 dBi). La valeur de −80 dBm/Hz utilisée dans cet exemple de calcul est cohérente avec les niveaux médians figurant dans les résultats du CRC (voir § A3.2), mais elle ne rend pas nécessairement compte des éventuels niveaux de crête, supérieurs de 20 dB d'après les observations.

La pénétration du marché est égale à η_{PEN} = 0,05 modem CPL par habitant. D'autres études, présentées au § A2.4.3, utilisent un taux de pénétration (systèmes CPL par ménage) compris entre 20% et 35%, avec une moyenne de 30%.

Le facteur d'utilisation de chaque modem est égal à η_{USAGE} = 0,3. Les résultats des essais du CRC montrent qu'un modem de type *Indoor* continue de fonctionner et d'émettre un signal RF même en l'absence de transmission de données. En outre, certains modems fonctionnent avec un facteur d'utilisation de 50% (100% par paire de modems) et les modems d'un système CPL de type *Access* avec un facteur d'utilisation beaucoup plus faible.

La grille correspondant à l'emplacement de l'émetteur couvre une zone comprise entre –120° et –50° en longitude et –15° et 55° en latitude, les modems CPL situés à l'extérieur de cette zone n'étant pas pris en compte. Dans cette analyse, on ne connaît pas *a priori* les caractéristiques de l'antenne de réception: on prend donc l'hypothèse d'une antenne de réception isotrope.

On utilise une prévision de données démographiques pour 2010.

Ci-dessous figure la sortie de l'exécution de l'outil CPL cumulatif dans MATLAB:

```
------------------------------------------------------------------------
Cumulative PLT Tool
Roald Otnes, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), October 2006
NATO RTO IST-050/RTG-022 on HF Interference, Procedures and Tools
------------------------------------------------------------------------
This program will estimate the cumulative effects from PLT,
based on ICEPAC sky wave path loss predictions and population data
from «Gridded population of the world» (gpwv3) database
The program has been tested on MATLAB versions 6.5 and 7.1,
```

and with ICEPAC version 05.0119WW

Please run ICEAREA INVERSE one time as normal to set up all parameters, before
running this program to sweep some of the parameters.
ICEAREA INVERSE will then be called (batch mode) for all chosen parameter combinations.

Use of text-based interface:

Enter will provide default parameters.
Use MATLAB syntax for the parameters to be swept.
Be aware that using default values for all swept parameters will take very long time to run.
Ctrl-C in MATLAB window to abort.
Do NOT close down the ICEPAC window that pops up; that will make Windows confused.
ICEAREA INVERSE batch calculation: (C)ompute new or (L)oad previous? c
ICEPAC installation directory [c:\itshfbc\]:
Select the input file created from the initial setup run (eg.WINNIPEG.ice)
ICEPACfile =
WINNIPEG
Swept months [2:2:12]: 2:2:12
Swept UTCs [0:4:20]: 0:4:20
Swept SSNs [50 100 200]: [50 100 200]
Swept Qs [0 5]: [0 5]
Swept freqs [2 4 8 16 24]: [2 4 8 12 16 20 24]
Total number of ICEAREA INVERSE runs planned: 1 512
Save ICEAREA INVERSE results for later use (disk space required: 20 267.1 MB). [Y]/N? Y
Output directory [.\ICEPAC\]:
Select population file (eg. glp10ag15.bil for 2010 data)

EIRP per PLT modem (dBm/Hz) [–80]:
Market penetration (PLT modems per capita) [0.05]:
Duty cycle (fraction of time each PLT modem is transmitting) [0.3]:
Market factor (penetration * duty cycle): –18.2 dB
EIRP per capita: –98.2 dBm/Hz

Results will be saved to file .\icepac\WINNIPEG_summary.txt

Modifying ICEAREA INVERSE input files
copy c:\itshfbc\run\temp1.txt c:\itshfbc\run\iceareax.da1
        1 file(s) copied.
copy c:\itshfbc\run\temp2.txt c:\itshfbc\area_inv\default\WINNIPEG.ice
        1 file(s) copied.
c:\itshfbc\bin_win\icepacw.exe c:\itshfbc\ INV CALC default\WINNIPEG.ice
copy c:\itshfbc\area_inv\default\WINNIPEG.ig1 .\icepac\WINNIPEG_00001.ig1
        1 file(s) copied.

Integral of population / loss over entire area: –31.4 dB
Received PLT noise: –129.7 dBm/Hz

Atmospheric noise lower limit: –159.7 dBm/Hz
Man-made, rural: –115.0 dBm/Hz
Man-made, quiet rural: –129.0 dBm/Hz
Absolute protection requirement: –139.1 dBm/Hz

Et ainsi de suite pour les 1 511 autres combinaisons de paramètres.

La fenêtre de commande MATLAB, dont le contenu figure ci-dessus, commence par des références documentaires et des instructions d'utilisation. Viennent ensuite les paramètres d'entrée de l'utilisateur et de brefs comptes rendus de chaque exécution d'ICEPAC. La première des 1 512 exécutions (pour 6*6*3*2*7 combinaisons de paramètres) est reproduite ci-dessus. Les 1 512 exécutions d'ICEPAC avec la grille de 281 × 281 utilisée dans l'exemple ont duré au total quelque 22 heures sur un ordinateur fixe standard datant de 2006 environ. La sauvegarde pour utilisation ultérieure (facultative) des résultats détaillés produits par ICEPAC occupe 20 GB d'espace disque.

Etant donné que le paramètre d'entrée «p.i.r.e. par modem CPL» est normalisé par rapport à la largeur de bande et fourni en dBm/Hz, l'évaluation du signal CPL cumulatif est également fournie dans cette unité (dBm/Hz). Les résultats sont sauvegardés dans un fichier au format texte dont les données sont séparées par des tabulations, chaque ligne représentant une exécution d'ICEPAC, comme pour l'exemple WINNIPEG fourni au § 5.1. (NOTE – en ce qui concerne les exécutions rejetées, la valeur correspondant à la colonne «PLT Noise» (Bruit CPL) est remplacée par «NaN»):

WINNIPEG [ISOTROPE], 2010 population data, e.i.r.p. = –98.2 dBm/Hz per capita

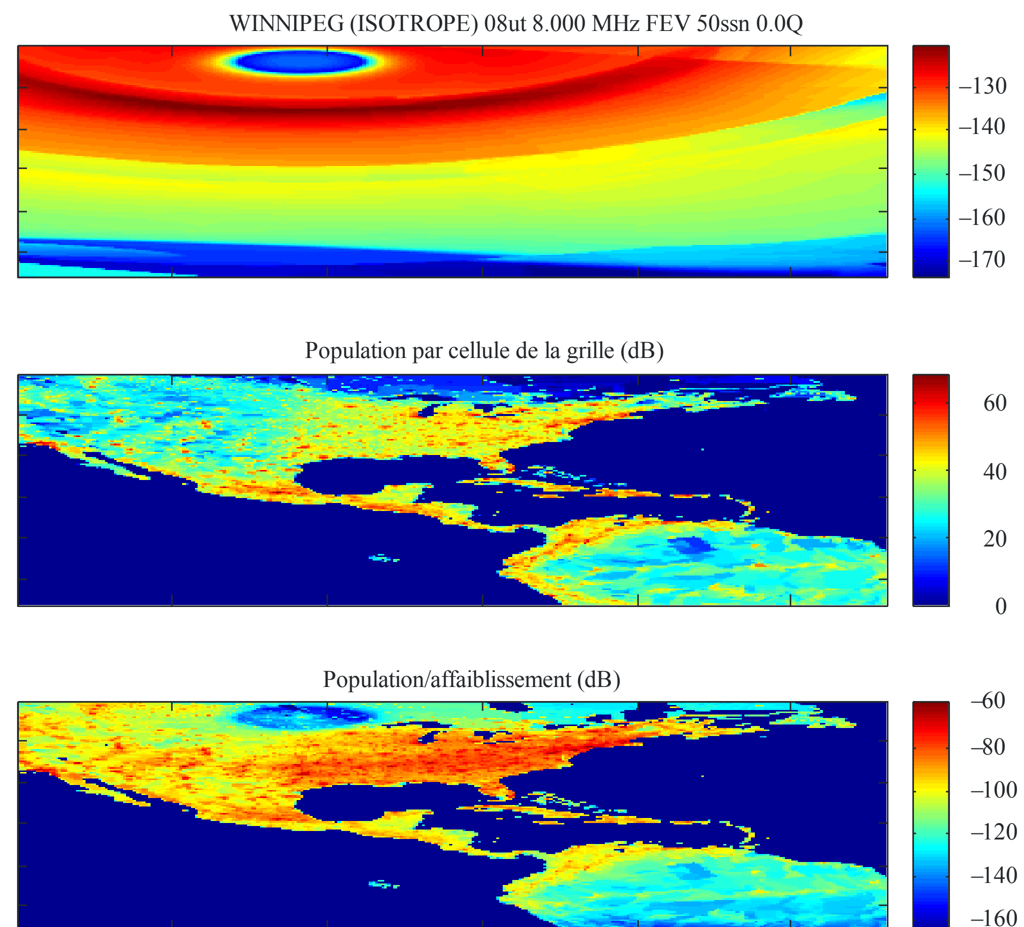
Month	UTC	SSN	Q	Freq	PLT noise	Atm (low)	Rural	Quiet rural	Abs. prot. req.
2	0	50	0	2.000	–129.69	–159.65	–114.99	–129.01	–139.06
2	0	50	0	4.000	–134.53	–152.37	–123.18	–137.62	–145.08
2	0	50	0	8.000	–139.32	–146.21	–131.36	–146.23	–151.10
2	0	50	0	16.000	–149.54	–160.64	–139.55	–154.84	–157.12
2	0	50	0	24.000	–165.75	–187.36	–144.34	–159.87	–160.65

Cartes en sortie de l'outil CPL cumulatif

L'outil CPL cumulatif permet également de tracer des cartes qui illustrent la correspondance entre l'affaiblissement le long du trajet calculé par ICEPAC et la densité de population. Pour utiliser cette fonctionnalité, il est nécessaire que les résultats détaillés d'ICEPAC aient été sauvegardés sur le disque. La Fig. A2-13 illustre le cas où le signal CPL calculé dépasse le bruit artificiel médian en zone rurale calme de plus de 6 dB. En général, les valeurs élevées du niveau de signal CPL calculé correspondent aux cas où il y a un faible affaiblissement le long du trajet dans des régions à forte densité de population. Plusieurs Membres du Secteur ont conclu que les paramètres utilisés dans l'exemple étaient raisonnables et que les résultats, selon lesquels les niveaux de signal CPL dépassent le bruit artificiel médian en «zone rurale calme» d'au moins 6 dB, étaient corrects.

FIGURE A2-13

Premier tracé: affaiblissement médian le long du trajet (dB) calculé par ICEPAC pour une combinaison de paramètres d'entrée correspondant à un récepteur situé à Winnipeg; deuxième tracé: population par cellule de taille 0,25° × 0,25° en dB (10 $\log_{10}$ (population)); troisième tracé: produit (somme en dB) des deux premiers tracés



Les cartes de la Fig. A2-13 sont produites à l'aide de l'outil CPL cumulatif sous MATLAB, comme indiqué ci-dessous:

ICEAREA INVERSE batch calculation: (C)ompute new or (L)oad previous? L
ICEPACfile =
WINNIPEG
(C)ompute cumulative PLT noise for all files, or (P)lot One? p
Select UTC, one of (0 4 8 12 16 20): 8
Select Freq, one of (2 4 8 16 24): 8

EIRP per PLT modem (dBm/Hz) [-80]:
Market penetration (PLT modems per capita) [0.05]:
Duty cycle (fraction of time each PLT modem is transmitting) [0.3]:
Market factor (penetration * duty cycle): –18.2 dB
EIRP per capita: –98.2 dBm/Hz

Month: 2 / UTC: 8 / SSN: 50 / Q: 0 / Freq: 8.00
Integral of population / loss over entire area: –41.3 dB
Received PLT noise: –139.6 dBm/Hz
Atmospheric noise lower limit: –146.2 dBm/Hz
Man-made, rural: –131.4 dBm/Hz
Man-made, quiet rural: –146.2 dBm/Hz
Absolute protection requirement: –151.1 dBm/Hz

A2.4.1.6 Gain d'antenne du système de transmission en ligne

Le gain d'antenne d'un système de transmission en ligne est défini comme le rapport entre la p.i.r.e. et la puissance injectée. Pour les systèmes CPL, plusieurs résultats de mesure ont été publiés dans la littérature scientifique et le rapport du Groupe opérationnel de recherche recommande d'utiliser les gains d'antenne suivants:

– –30 dBi pour les systèmes de type *Indoor*;

– –15 dBi pour les systèmes aériens de type *Access*;

– –50 dBi pour les systèmes souterrains de type *Access*.

Il convient de noter que ces chiffres présentent des incertitudes de l'ordre de ±5 à ±10 dB du fait de la dispersion statistique. En outre, dans le cas des lignes électriques aériennes des systèmes de type *Access*, aux fréquences de résonance, le gain de l'antenne peut être supérieur de 10 à 13 dB.

A2.4.1.7 Evaluation de la pénétration du marché des systèmes CPL actuelle

Au § 5.6.5, une valeur estimée de la pénétration du marché égale à $\eta_{PEN} = 0,05$ à été utilisée pour les exemples de calcul. Les données relatives au marché sont généralement difficiles à obtenir et à prévoir, car les vendeurs ne divulguent pas facilement ce type d'information, sans oublier que la technologie est toujours en cours de développement. Selon une prévision du développement du marché des CPL[39], il y aurait, d'ici 2010, entre 2,5 et 5 millions d'abonnés au CPL de type *Access* aux Etats-Unis, soit une pénétration du marché comprise entre 0,9 et 1,7% de la population. En Allemagne, le nombre de dispositifs HomePlug «sur le marché» en février 2005 était de 300 000, et de 800 000 en février 2006[40]. Cette information a été communiquée au Groupe opérationnel par l'association allemande BITKOM (industrie) via le ministère allemand de l'Industrie. L'Allemagne comptant à l'époque 82 millions d'habitants, la pénétration du marché HomePlug en février 2006 était donc de 0,01 modem par habitant. En avril 2006, Intellon avait vendu 10 millions de chipsets HomePlug dans le monde et en avait livré 5 millions[41] (Intellon, DS2 et Panasonic sont des vendeurs de chipsets CPL de premier plan). L'utilisateur de l'outil CPL cumulatif peut saisir pour ce paramètre la valeur qui lui convient.

A2.4.1.8 Conclusions

Le terme «critère de protection absolue», créé par le Groupe opérationnel de recherche, a été conservé dans la présente étude afin de préserver l'intégrité de l'outil CPL cumulatif. Le niveau de protection absolue n'influe pas sur les calculs. Il est seulement utilisé à des fins de comparaison, au même titre que les différents niveaux de bruit des catégories d'environnement. Le Groupe de travail 5C n'a pas conclu d'études sur les niveaux de protection des services de radiocommunications de Terre vis-à-vis des systèmes CPL. La méthodologie décrite dans le présent document, qui repose sur la méthode ICEPAC de prévision de la propagation, peut servir à prévoir le brouillage cumulatif de l'onde ionosphérique causé par les systèmes CPL dans la bande des fréquences décamétriques. Cette technique peut être utilisée pour analyser l'incidence des signaux CPL sur un récepteur dans le cadre des études de brouillage des radiocommunications de Terre.

---

[39] HELD J., *Understanding Broadband over Power Line,* Auerbach Publications, 2006.

[40] BITKOM-Informationen zu Anwendungen der Powerline-Technologie, Stand März 2006.

[41] BPL Today, 11 avril 2006, p. 3.

A2.4.2 Etude de la NTIA portant sur la propagation ionosphérique et l'agrégation des rayonnements des systèmes CPL de type *Access*

A2.4.2.1 Introduction

L'objectif de l'étude de la NTIA était de passer en revue et d'analyser les effets possibles d'un déploiement massif de systèmes CPL de type *Access* sur les niveaux de bruit cumulés à l'échelle d'un pays. L'effet cumulatif des brouillages causés par les CPL serait dû, le cas échéant, à la propagation ionosphérique. Etant donné que les systèmes CPL actuels utilisent les fréquences décamétriques et que la modélisation des lignes électriques transportant des CPL montre que la plus grande part des rayonnements CPL est dirigée vers le haut, les émissions CPL dans la bande des fréquences décamétriques sont susceptibles de parcourir de nombreux kilomètres au-delà de leur source. De plus, compte tenu du fait qu'un point d'écoute donné peut recevoir des rayonnements CPL de nombreuses sources, la possibilité existe d'une agrégation de signaux qui élèverait le niveau de bruit de fond du récepteur et, partant, rendrait des signaux utiles de faible puissance incompréhensibles. En règle générale, la propagation ionosphérique se produit à des fréquences comprises entre 1,7 MHz et 30 MHz, intervalle choisi dans l'étude de phase 1 de la NTIA sur les CPL[42].

A2.4.2.2 Modélisation analytique de la propagation par l'onde ionosphérique

Cadre général

L'analyse présentée ici utilise le logiciel VOACAP de prévision statistique de la propagation dans la bande des fréquences décamétriques[43] ainsi que des modèles de lignes électriques aériennes et souterraines reposant sur le logiciel NEC[44].

La NTIA a utilisé le logiciel VOACAP en mode «area» (zone) pour calculer les émissions cumulées reçues en de nombreux points du fait de déploiements à grande échelle de systèmes CPL. Elle a placé, au centre géographique de chaque comté des Etats-Unis, des émetteurs CPL équivalents, chacun représentant le total des émissions CPL du comté correspondant. Les simulations de propagation ont été lancées séquentiellement pour chaque émetteur, les points de réception étant situés sur un quadrillage fixe qui couvre l'ensemble de la zone continentale des Etats-Unis. Les résultats ont ensuite été additionnés dans le domaine des puissances. La NTIA a lancé ces simulations pour un grand nombre de conditions d'horaire et de fréquences.

Démarche

Modèles des lignes électriques

Pour cette étude, la NTIA a déterminé les niveaux de puissance rayonnée par chaque émetteur CPL équivalent à l'aide d'un modèle très élaboré de lignes de tension aériennes. Ces niveaux de puissance ont été calculés en suivant les principes de mesure adoptés dans l'Ordonnance CPL de la FCC[45]. La NTIA a calculé quelle puissance de sortie rayonnée par le modèle de lignes électriques

---

[42] Etude de phase 1 de la NTIA, Vol. I, section 5.2.2, disponible à l'adresse http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/bpl/index.html.

[43] Le package logiciel portant sur la propagation par l'onde ionosphérique NTIA/ITS peut être téléchargé à l'adresse http://www.greg-hand.com/hfwin32.html.

[44] Le logiciel NEC (Code électromagnétique numérique) de modélisation électromagnétique par la méthode des moments est disponible sur le site du laboratoire Lawrence Livermore National Laboratory à l'adresse https://ipo.llnl.gov/?q=technologies-software-browse_software-app&s=NEC.

[45] BPL Report and Order, annexe C, *Measurement Guidelines* 2.b.

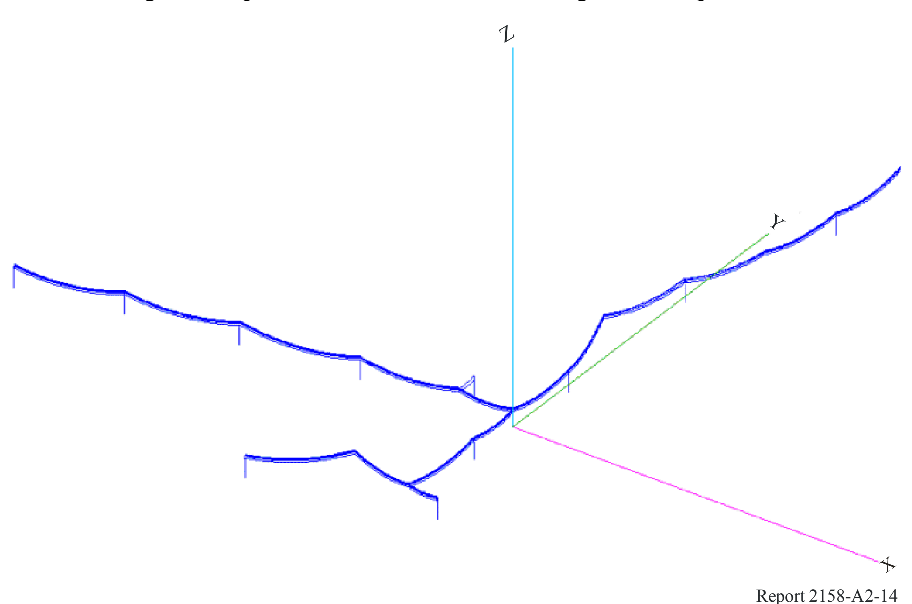
se traduirait par des champs électriques correspondant aux limites fixées par la Partie 15. Le résultat a ensuite été extrapolé à plus grande échelle en utilisant le modèle de déploiement de la NTIA et la population du comté afin d'obtenir la puissance de sortie de chaque émetteur CPL équivalent (Tableau A2-1).

Le modèle de lignes aériennes a été élaboré à partir d'une structure de lignes électriques réelles sur laquelle la NTIA a effectué des mesures d'émissions CPL (Figs A2-14 et A2-15). Ce modèle, issu d'observations et de mesures *in situ,* a été développé à des fins de simulation à l'aide du NEC-4.1. Tout en respectant les contraintes du programme, le modèle a été conçu pour cadrer autant que possible avec les caractéristiques réelles du réseau électrique, y compris en ce qui concerne l'utilisation de câbles porteurs longitudinaux, le placement correct des charges des transformateurs, la hauteur et la position des câbles sur les poteaux électriques, les câbles de garde, les câbles montants, la position des poteaux et les jonctions de câbles.

La taille totale du modèle était d'environ 328 m selon l'axe des x et 435 m selon l'axe des y. La hauteur des lignes électriques modélisées était de 12 m. L'espacement entre les lignes d'énergie était de 0,6 m, avec une ligne de neutre mise à la terre en des points multiples et située à 1 m au-dessous des autres lignes. Tous les câbles avaient un diamètre de 12,6 mm et pour conductivité celle du cuivre ($5{,}8 \times 10^7$ S/m). Le plan de sol du modèle (une structure de Terre plate au-dessous des câbles) possédait les caractéristiques types d'un «bon» sol (permittivité diélectrique de 15,0; conductivité de 0,005 S/m).

FIGURE A2-14

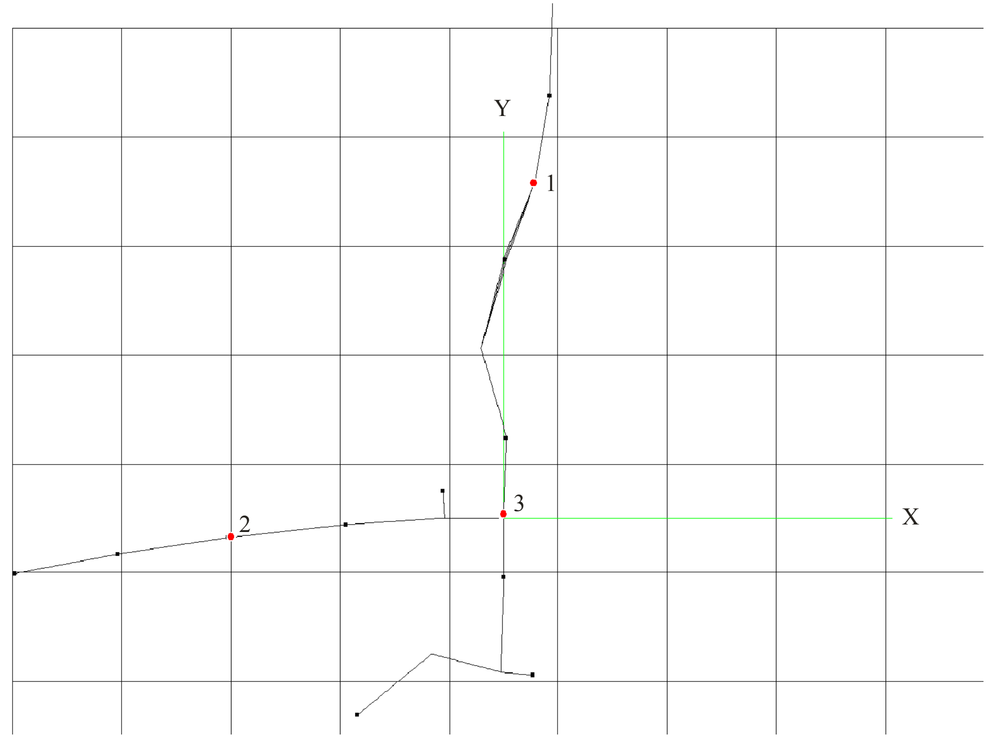
Vue angulaire représentant le modèle évolué de lignes électriques aériennes



Report 2158-A2-14

FIGURE A2-15

Vue aérienne du modèle de lignes électriques illustrant les points d'injection CPL (points rouges). Pour la présente analyse, le point d'injection 3 a été utilisé. Les transformateurs de distribution (charges d'impédance sur le neutre) sont illustrés par des points noirs

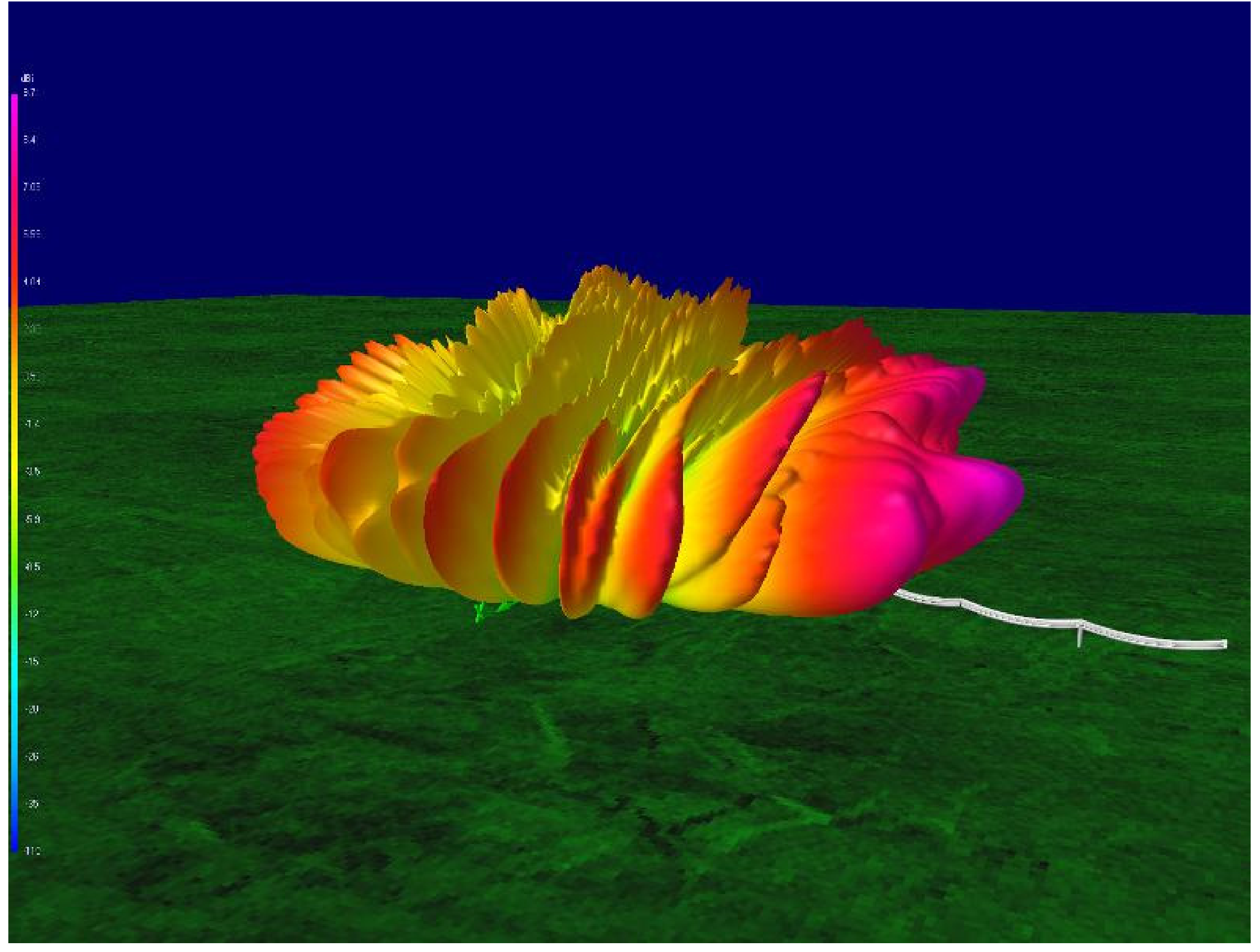


Report 2158-A2-15

Un exemple de diagramme de rayonnement calculé pour une fréquence de 16 MHz à l'aide de ce modèle est présenté à la Fig. A2-16.

FIGURE A2-16

Exemple de diagramme de rayonnement du gain de directivité en champ lointain à 16 MHz, avec injection du signal au point d'injection 3



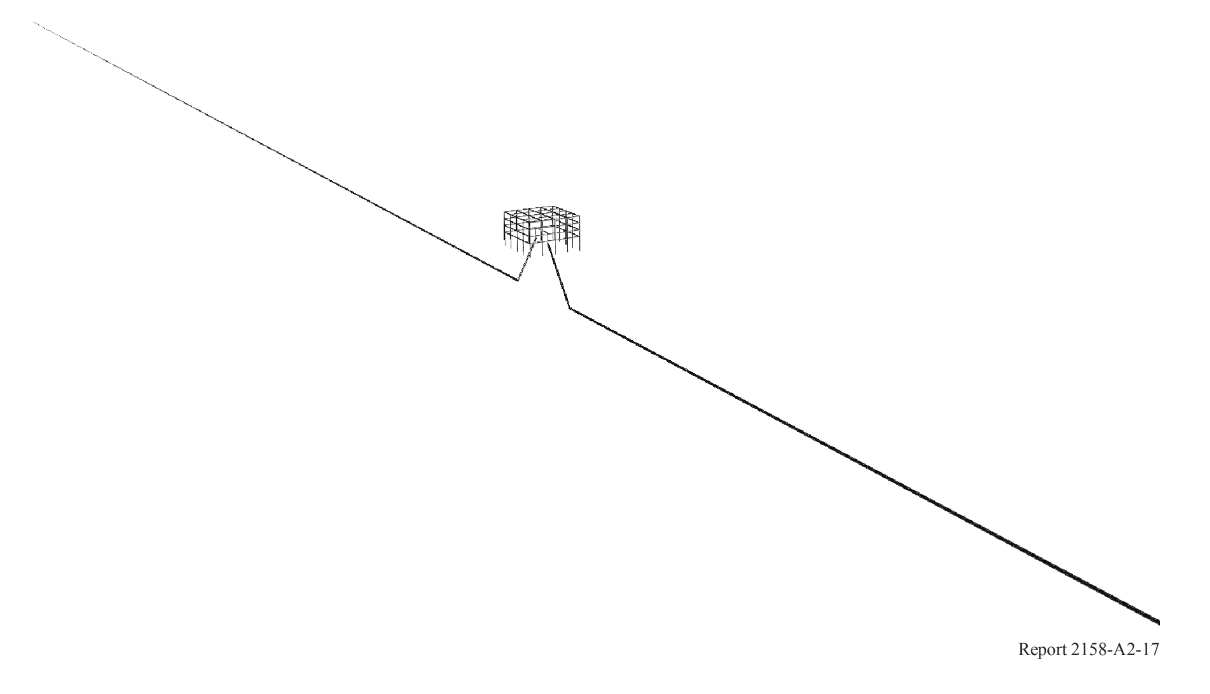
Report 2158-A2-16

La NTIA a élaboré un autre modèle NEC pour un système CPL souterrain (Figs A2-17 et A2-18). Comme pour le modèle aérien, elle a utilisé le NEC pour calculer, à partir du modèle souterrain, les diagrammes de rayonnement représentant le gain de directivité (qui dépendent de la fréquence) ainsi que la puissance rayonnée nécessaire pour atteindre les limites fixées par la Partie 15. Dans ce cas également, les nouveaux principes de mesures CPL spécifiés dans l'Ordonnance CPL ont servi de base aux calculs de la puissance rayonnée[46]. Les niveaux de puissance rayonnée sont récapitulés au Tableau A2-1.

46 BPL Report and Order (Ordonnance CPL), appendice C, *Measurement Guidelines* 2.b.

FIGURE A2-17

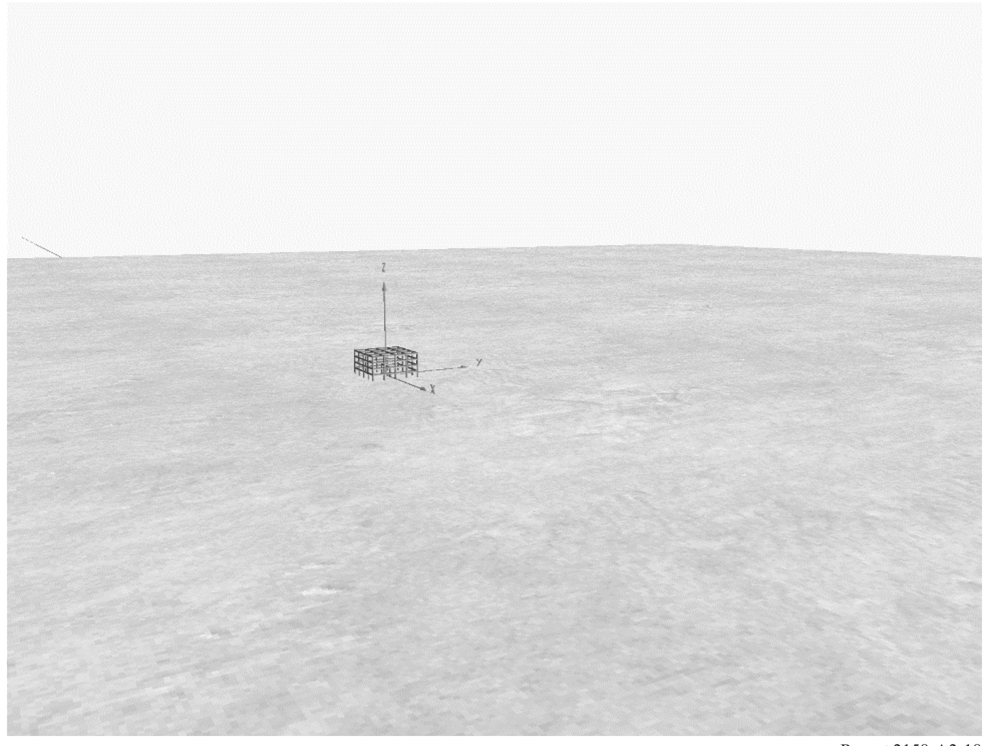
Modèle de lignes électriques souterraines avec suppression du sol. La ligne souterraine, composée de trois conducteurs de neutre entourant un câble central isolé diélectriquement, s'étend sur 340 m de bout en bout



Report 2158-A2-17

FIGURE A2-18

Modèle de lignes électriques souterraines avec représentation du sol. La boîte grillagée représente un transformateur en surface, dans lequel est installée la source CPL



Report 2158-A2-18

TABLEAU A2-1

Puissance structurelle rayonnée par les CPL aux limites définies par la Partie 15

Fréquence (MHz)	Puissance rayonnée (dBW/Hz)	
	Aérien	Souterrain
2	–103,04	–94,26
4	–106,71	–87,84
6	–104,38	–84,66
8	–102,99	–82,73
10	–102,89	–83,29
12	–102,93	–79,38
14	–104,06	–78,43
16	–106,32	–74,75
18	–97,48	–75,16
20	–103,48	–79,52
22	–104,29	–81,67
24	–101,04	–82,24
26	–105,71	–82,45
28	–100,98	–83,47
30	–98,04	–84,28

On voit que la puissance rayonnée calculée par le NEC est supérieure dans le cas des structures souterraines. Cela n'est pas surprenant car l'affaiblissement dû au sol dans les diagrammes de gain de directivité calculés par ce programme viennent ensuite réduire cette puissance de façon importante. On peut donc s'attendre à ce que le modèle souterrain de la NTIA émette sensiblement plus de puissance que les systèmes aériens, et ce aux limites fixées par la Partie 15. L'utilisation conjointe du modèle aérien et du modèle souterrain augmente considérablement la complexité de la modélisation par rapport aux travaux précédents, ce qui explique largement la plus grande variabilité de la puissance rayonnée avec la fréquence.

L'Ordonnance CPL spécifie que les mesures de conformité doivent être effectuées à une hauteur de 1 m et, le long de la ligne électrique à partir du dispositif CPL, à des intervalles multiples d'un quart de longueur d'onde, jusqu'à une distance égale à une longueur d'onde relative à la fréquence de milieu de bande[47].

Les niveaux de puissance rayonnée ont été obtenus en alimentant les modèles NEC avec une source de tension unitaire, les valeurs du champ magnétique ou électrique étant obtenues par simulation NEC en des points appropriés autour des modèles – comme spécifié dans les principes de mesures CPL –, toutes les valeurs de champ électrique suivantes étant multipliées par le dividende du rapport entre le champ électrique calculé et la limite définie dans la Partie 15. Pour transposer cette

---

[47] Voir le paragraphe 2.b.2 de l'appendice C «*Measurement Guidelines*» de l'Ordonnance CPL pour une description des mesures supplémentaires éventuellement requises si la fréquence de milieu de bande du signal CPL est supérieure ou égale à deux fois la plus basse des fréquences du signal CPL injecté sur la ligne.

mise à l'échelle dans le domaine des puissances, les niveaux de puissance rayonnée calculés par le NEC ont été normalisés par le carré de ce facteur.

Utilisation du programme VOACAP (Voice of America Coverage Analysis Program)

La NTIA a calculé les valeurs de puissance de brouillage CPL et de bruit artificiel en utilisant le mode «area» du logiciel VOACAP sur un quadrillage fixe de 31 × 31 points de réception couvrant la zone continentale des Etats-Unis et centré sur Kansas City, Missouri[45]. Pour simuler les émetteurs CPL équivalents dans le centre géographique de chaque comté des Etats-Unis (y compris l'Alaska et Hawaï), les densités de déploiement des CPL ont été partiellement déterminées à partir de données de recensement américaines[48]. Les diagrammes de rayonnement de ces émetteurs représentant le gain de directivité (qui dépend de la fréquence) ont été calculés à l'aide du modèle de lignes électriques aériennes ou du modèle de lignes souterraines. Les émetteurs ont été placés au centre géographique de chaque comté. Les diagrammes de rayonnement utilisés ont été arithmétiquement moyennés en azimut afin de simuler l'orientation aléatoire de multiples lignes électriques transportant des CPL, telles qu'elles se présentent au niveau de chaque émetteur équivalent.

La NTIA a effectué des simulations complètes d'agrégation ionosphérique avec le modèle évolué de lignes aériennes, sur un jeu complet de plus de 8 500 ensembles de conditions (couvrant notamment tous les mois de l'année, toutes les heures du jour, de faibles et de hauts niveaux d'activité solaire, et des fréquences comprises entre 2 et 30 MHz par incréments de 2 MHz). Ces simulations lui ont permis de calculer le rapport «brouillage plus bruit/bruit», ou $(I + N)/N$, dans plusieurs configurations de déploiement d'un grand nombre de dispositifs CPL[49]. Les résultats présentés ici ont été examinés en termes d'ensembles de conditions produisant les augmentations les plus défavorables du bruit de fond du récepteur local.

Des analyses de propagation analogues ont été effectuées pour le modèle souterrain avec un large échantillon d'horaires, de fréquences, de mois et de conditions d'activité solaire (soit plus de 1 300 ensembles de conditions), y compris les conditions qui avaient donné les plus grands rapports brouillage/bruit cumulés lors de la simulation avec le modèle de lignes aériennes.

Le logiciel VOACAP fournit les résultats de propagation sous la forme de rapports signal/bruit (SNR). Le Tableau A2-2 montre comment les valeurs de SNR produites par VOACAP se traduisent par des augmentations du bruit de fond.

---

[48] Observations de la NTIA, section 4.2 de l'annexe technique, disponible à l'adresse: http://www.ntia.doc.gov/ntiahome/fccfilings/2004/BPLTechAppdx_06042004.doc. Voir également: County and City Data Book: 2000, U.S. Census Bureau, National Data Summary File 1, Table P-15.

[49] Dans le présent rapport, $(I + N)/N$ est également désigné «augmentation du bruit de fond».

TABLEAU A2-2

Augmentation du bruit de fond (*I* + *N*)/*N* en fonction du SNR

Augmentation du bruit de fond (*I* + *N*)/*N* (dB)	**SNR (dB)**
3	0
1	–5,868
0,5	–9,135
0,1	–16,327
0,05	–19,363
0,01	–26,373
0,005	–29,386

A2.4.2.3 Caractéristiques de la simulation

La NTIA a effectué des simulations pour deux valeurs du paramètre SSN (nombre de taches solaires moyenné): une valeur haute (150) pour simuler des caractéristiques de propagation excellentes au maximum du cycle solaire de 11 ans, et une valeur basse (25) pour simuler des caractéristiques de propagation médiocres au minimum du cycle solaire. Du fait de la conception du logiciel, tous les points de réception étaient modélisés par l'antenne unipolaire verticale quart d'onde de VOACAP (type 22) placée au-dessus d'un sol de permittivité diélectrique $\varepsilon_r = 15$ et de conductivité $\sigma = 0{,}005$ S/m[50]. En réalité, aux Etats-Unis, les caractéristiques du sol sont variables: de «sol de piètre qualité» ($\varepsilon_r = 3$ et $\sigma = 0{,}001$ S/m) à «sol d'excellente qualité» ($\varepsilon_r = 20$ et $\sigma = 0{,}030$ S/m).

Pour simuler au mieux les conditions de réception de nombreux sites gouvernementaux américains, le niveau de bruit artificiel de tous les points de réception a été fixé au niveau de bruit des zones rurales calmes ou reculées (-164 dBW/Hz à 3 MHz)[51]. Comme dans le cas des antennes, du fait de la conception du logiciel, tous les points de réception de la grille de calcul de VOAAREA se sont vus attribuer un même niveau de bruit artificiel. En réalité, le niveau de bruit artificiel aux Etats-Unis est variable: d'un faible niveau dans les zones rurales calmes à un très haut niveau dans les zones industrielles.

La NTIA a normalisé individuellement les niveaux de puissance rayonnée calculés par le NEC pour chaque émetteur équivalent d'un comté par le nombre de dispositifs CPL actifs susceptibles de desservir les foyers des villes du comté en question. L'analyse a pris en compte les ménages vivant en zone urbaine (tels que définis par le Bureau américain du recensement), étant donné qu'ils

---

[50] VOAAREA permet d'attribuer à l'antenne verticale une longueur fixe en mètres ou de faire varier la longueur avec la fréquence. Dans son étude, la NTIA a considéré qu'un récepteur susceptible d'être brouillé à une fréquence donnée serait doté d'une antenne conçue pour cette fréquence; la longueur de l'antenne a donc été fixée à un quart de longueur d'onde pour chaque fréquence (par exemple, 7,5 m à 10 MHz). VOACAP ajuste automatiquement cette longueur de sorte que le diagramme de réception reste le même quelle que soit la fréquence. Comme il est de mise pour une antenne unipolaire, le gain maximum de l'antenne a été fixé à 3 dB au-dessus du gain maximum d'un doublet, et ce pour toutes les hauteurs.

[51] Dans cette étude, le niveau de bruit est déterminé à partir de la Recommandation UIT-R P.372, qui est implémentée dans VOACAP/VOAAREA.

présentent de plus grandes densités de déploiement que les ménages des zones rurales et qu'ils correspondent donc, plus probablement, au gros des premiers déploiements de service CPL de type *Access*. Comme dans l'analyse précédente, la NTIA a considéré que l'injecteur CPL avait une capacité de gestion de données suffisante pour desservir une moyenne de 30 usagers et qu'un ménage sur quatre en zone urbaine était abonné au service CPL. Autrement dit, l'hypothèse était d'un injecteur CPL pour 120 ménages en zone urbaine, soit, compte tenu des presque 85 millions de foyers vivant en zone urbaine aux Etats-Unis, un total de plus de 705 000 dispositifs CPL modélisés dans cette étude[52].

Plusieurs autres facteurs ont été pris en compte pour prévoir l'augmentation du bruit de fond des récepteurs. Premièrement, la NTIA a considéré que seule une partie des dispositifs CPL fonctionnerait à la limite définie par la Partie 15; elle a donc pris pour hypothèse un signal rayonné moyen inférieur de 4 dB à cette limite. Deuxièmement, l'analyse VOAAREA reposait sur des valeurs quadratiques moyennes (RMS); un ajustement a donc été effectué pour convertir en niveaux quadratiques moyens les niveaux de signaux CPL de quasi-crête correspondant aux mesures de conformité avec la limite FCC[53]. Troisièmement, étant donné que les dispositifs du système ne fonctionnent pas tous à la même fréquence[54], une marge de 6 dB a été prise (autrement dit, par hypothèse, 25% des injecteurs CPL fonctionnent à la même fréquence). Enfin, le facteur d'utilisation supposé des dispositifs CPL a été fixé à une valeur moyenne de 55%. Ces ajustements des niveaux de puissance rayonnée par les CPL figurent au Tableau A2-3.

TABLEAU A2-3

Facteurs d'ajustement applicables aux dispositifs CPL de type *Access*

Facteur	Ajustement (dB)
Dispositifs fonctionnant à des niveaux inférieurs aux limites fixées par la Partie 15	–4
Conversion des valeurs de quasi-crête vers les valeurs quadratiques moyennes	–3
Facteur de répartition des dispositifs fonctionnant à la même fréquence	–6
Facteur d'utilisation	–2,6
Total	–15,6

Les points de réception de la grille de calcul VOAAREA avaient une largeur de bande de 1 Hz (fixée en ramenant la puissance de signal CPL brouilleur rayonnée par chaque point d'émission à la puissance en dB(W/Hz)). Les niveaux de puissance de bruit calculés par VOAAREA étaient en dB(W/Hz). Les signaux reçus en un point de réception donné du fait des rayonnements produits par tous les dispositifs CPL équivalents ont été additionnés dans le domaine des puissances,

---

[52] Observations de la NTIA, annexe technique, § 4.

[53] Le choix du facteur de conversion «valeur de quasi-crête vers valeur quadratique moyenne » a été déterminé à partir de mesures tirées de l'étude de phase 1 de la NTIA, qui montre que la puissance de signal CPL mesurée à l'aide d'un détecteur de quasi-crête est, en règle générale, supérieure de 0 à 5 dB au niveau mesuré avec un détecteur de valeur moyenne. Etude de phase 1 de la NTIA, Volume II, section D.3.4.

[54] Etude de phase 1 de la NTIA , Vol. I, section 2.2.

indépendamment du niveau de puissance de bruit. Cette somme, qui correspondant à la puissance totale de brouillages dus aux CPL, et la puissance de bruit en ce point de réception ont permis de calculer le rapport brouillage/bruit. Le rapport brouillage/bruit cumulé global en un point donné correspondait donc à une largeur de bande de 1 Hz.

Le Tableau A2-4 récapitule les hypothèses susmentionnées qui ont servi à la simulation.

TABLEAU A2-4

Conditions de simulation

Emetteurs CPL équivalents	**Aérien**	**Souterrain**
Excitation	Source d'énergie sur ligne unique, placée au centre	Source d'énergie dans transformateur en surface, placée au centre
Diagramme de champ lointain		
Source	Modèle aérien NEC-4.1	Modèle souterrain NEC-4.1
Variabilité	Moyenné en azimut, variation de l'élévation et de la fréquence	
Type	Gain de directivité	
Niveau de puissance		
Source	Modèle aérien NEC-4.1	Modèle souterrain NEC-4.1
Limites de rayonnement de la structure	Limites fixées par la Partie 15, telles que mesurées en suivant les principes de mesure applicables aux systèmes CPL	
Mise à l'échelle du comté	Normalisation par le nombre de ménages vivant en zone urbaine dans le comté	
Paramètre utilisé	Valeur de «puissance rayonnée» de NEC-4.1 (puissance de sortie après les affaiblissements dus à la structure, excepté ceux dus au sol)	
Emplacement	Centre géographique de tous les comtés des Etats-Unis	
Type d'antenne	Antenne unipolaire quart d'onde (VOACAP type 22)	
Caractéristiques du sol	Sol «moyen»	
Conductivité	0,005 S/m	
Permittivité relative	15	
Emplacement	Points de réception situés sur un quadrillage 31 × 31 sur l'ensemble de la zone continentale des Etats-Unis	
Bruit	Conditions de bruit correspondant à une «zone rurale calme» à 3 MHz (–164 dB(W/Hz))	
Simulation		
Fréquences	De 2 à 30 MHz par incréments de 2 MHz	
Horaires	De 0 à 23 heures UTC par incréments de 1 heure	
Mois de l'année	De janvier à décembre	
Conditions relatives à l'activité solaire	Nombre de taches solaires moyenné (SSN) = 25 et 150	
Configuration géométrique du trajet principal	Trajet court	
Méthode de calcul	Lissage des trajets courts	
Paramètres calculés	Intensité de signal reçu (SDBW), bruit reçu (NDBW)	
Facteur d'ajustement de la puissance	–15,6 dB (détails au Tableau A2-3)	

A2.4.2.4 Résultats de la simulation

Pour estimer si un niveau de signal CPL cumulé donné présente un risque de brouillages préjudiciables pour des récepteurs de radiocommunication gouvernementaux aux Etats-Unis, la NTIA a pris en compte deux valeurs de seuil de $(I + N)/N$, ou augmentation du bruit de fond du récepteur[55]. Le seuil inférieur, correspondant à une augmentation de 1 dB du bruit de fond (soit un rapport brouillage CPL/bruit d'environ –5,9 dB), a été choisi comme niveau à partir duquel peuvent apparaître des brouillages préjudiciables. Le seuil supérieur, correspondant à une augmentation du bruit de fond de 3 dB (soit un rapport brouillage CPL/bruit de 0 dB), a été choisi comme niveau à partir duquel les brouillages préjudiciables présentent un risque significatif.

L'incidence de l'accumulation des rayonnements CPL a été analysée en combinant les niveaux de signal CPL des modèles aérien et souterrain avec les niveaux de bruit de fond, de façon à ce que la combinaison corresponde aux seuils susmentionnés d'augmentation du bruit de fond. Cette analyse a permis à la NTIA d'examiner les effets cumulés de la propagation par l'onde ionosphérique en faisant varier le nombre relatif de systèmes aériens et de systèmes souterrains.

Comparaison des résultats de l'analyse pour les systèmes aériens et souterrains

Les simulations ont montré que les systèmes aériens produisent des niveaux de signaux cumulés très supérieurs à ceux des systèmes souterrains, même lorsque les deux classes de système étaient réglées pour émettre aux limites fixées par la Partie 15. La valeur médiane du niveau de signal CPL cumulé émis par les systèmes aériens était supérieure d'environ 20 dB à celle d'un même nombre de systèmes souterrains, pour des caractéristiques identiques de propagation par l'onde ionosphérique, et ce dans toutes les conditions de simulation. Ce résultat semble indiquer que, du point de vue de l'agrégation des signaux dus à la propagation par l'onde ionosphérique, l'installation de dispositifs CPL dans la gamme de fréquences 1,7-30 MHz sur des câbles souterrains, lorsque cela est faisable, pourrait présenter des avantages importants par rapport à l'installation des mêmes dispositifs sur des lignes aériennes.

L'incidence relative de l'agrégation des signaux CPL dans les configurations aérienne et souterraine est présentée ci-dessous sous forme graphique. Les Figs A2-19 et A2-20 illustrent le nombre de dispositifs aériens et souterrains nécessaires pour produire l'augmentation du bruit de fond la plus défavorable de 1 ou 3 dB en tout emplacement géographique aux Etats-Unis, dans des conditions de meilleure propagation et de plus faible bruit de fond local.

Pour réaliser ces graphiques, la modélisation de l'agrégation ionosphérique a été utilisée pour déterminer les ensembles de conditions correspondant à une activité solaire faible ou importante pendant laquelle le rapport signal/bruit résultant de l'accumulation des rayonnements CPL est maximal. Pour tous les autres jeux de conditions et d'emplacements géographiques, le calcul de l'agrégation aboutit à une incidence moindre sur le bruit de fond. Par conséquent, dans la plupart des conditions simulées, pour produire un effet sur le bruit de fond local identique à celui représenté dans les Figs A2-19 et A2-20, il faudrait augmenter le nombre de dispositifs CPL.

Les calculs effectués pour des périodes d'activité solaire élevée ont montré que les niveaux de signaux CPL cumulés maximum apparaissent essentiellement aux fréquences supérieures de la bande décamétrique (18-30 MHz), en milieu d'après-midi et jusqu'en fin d'après-midi, à l'automne et en hiver. Les calculs effectués pour des périodes de faible activité solaire ont montré que les niveaux de signaux CPL cumulés maximum apparaissent essentiellement aux fréquences inférieures de la bande décamétrique (4-8 MHz). Ainsi que l'indiquent les calculs effectués pour des conditions d'activité solaire élevée, les niveaux de signaux CPL cumulés maximum apparaissent en fin d'après-midi, à l'automne et en hiver.

---

[55] Le terme «I» correspond à la puissance de signal brouilleur résultant des rayonnements CPL.

La Fig. A2-19 décrit les combinaisons de dispositifs CPL souterrains et aériens qui produisent des augmentations du bruit de fond de 1 dB (courbe inférieure) et de 3 dB (courbe supérieure). Cette figure correspond à la combinaison des conditions de propagation ionosphérique et de bruit (15 heures UTC en novembre à 30 MHz, avec une activité solaire élevée) qui produit le rapport signal CPL cumulé/bruit de fond local le plus important en tout point géographique. Dans ces conditions, il serait possible de déployer plus de 1,35 million de dispositifs CPL aériens avant de produire une augmentation de 1 dB du bruit de fond, quel que soit le point géographique considéré. Ce nombre passe à 5,23 millions de dispositifs CPL aériens pour une augmentation de 3 dB du bruit de fond cumulé global. En réduisant le nombre de dispositifs aériens et en augmentant le nombre de dispositifs souterrains, il est possible d'augmenter considérablement le nombre total de systèmes CPL déployés tout en conservant les mêmes niveaux d'augmentation du bruit de fond.

La Fig. A2-20 illustre le nombre de dispositifs CPL aériens par rapport au nombre de dispositifs souterrains qui produiraient une augmentation de 1 dB et 3 dB du bruit de fond du récepteur au minimum du cycle solaire. Les résultats sont identiques à ceux obtenus pour le maximum du cycle solaire: c'est en utilisant exclusivement des dispositifs CPL aériens que le nombre total de dispositifs CPL nécessaires pour atteindre les seuils est minimal. Ainsi, dans ces conditions, il faudrait environ 916 000 dispositifs CPL aériens pour augmenter le bruit de fond de 1 dB. En revanche, en utilisant exclusivement des dispositifs CPL souterrains dans la gamme 1,7-30 MHz, il serait possible de déployer presque 10 millions de dispositifs avant de produire la même augmentation du bruit de fond.

FIGURE A2-19

Comparaison du nombre de dispositifs CPL souterrains et du nombre de dispositifs CPL aériens qui produiraient la même augmentation du bruit de fond dans des conditions de SSN élevé

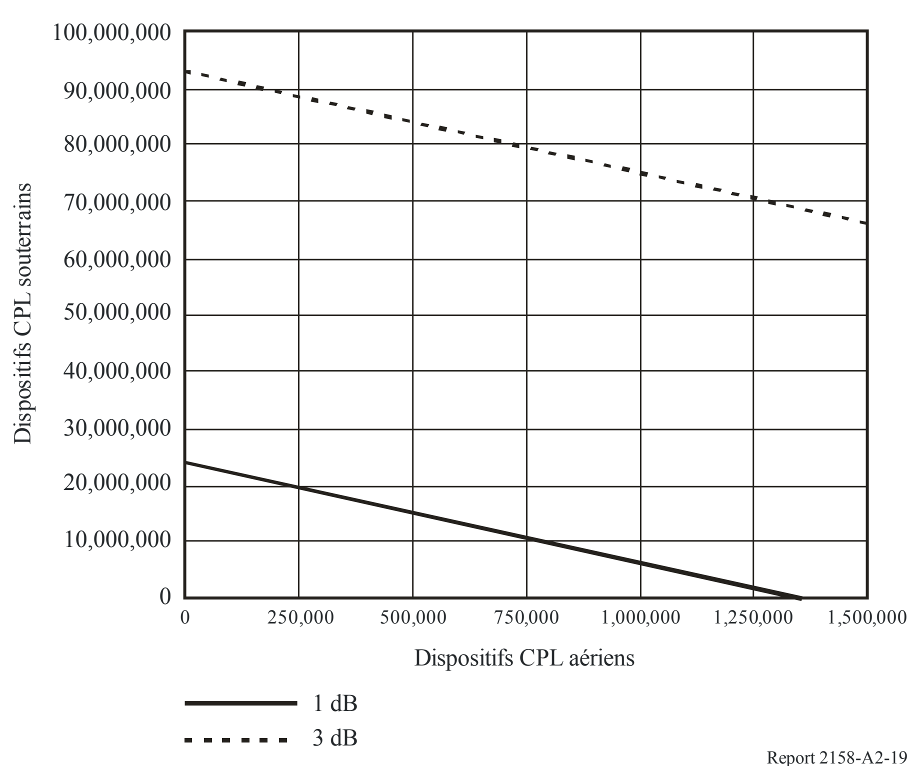
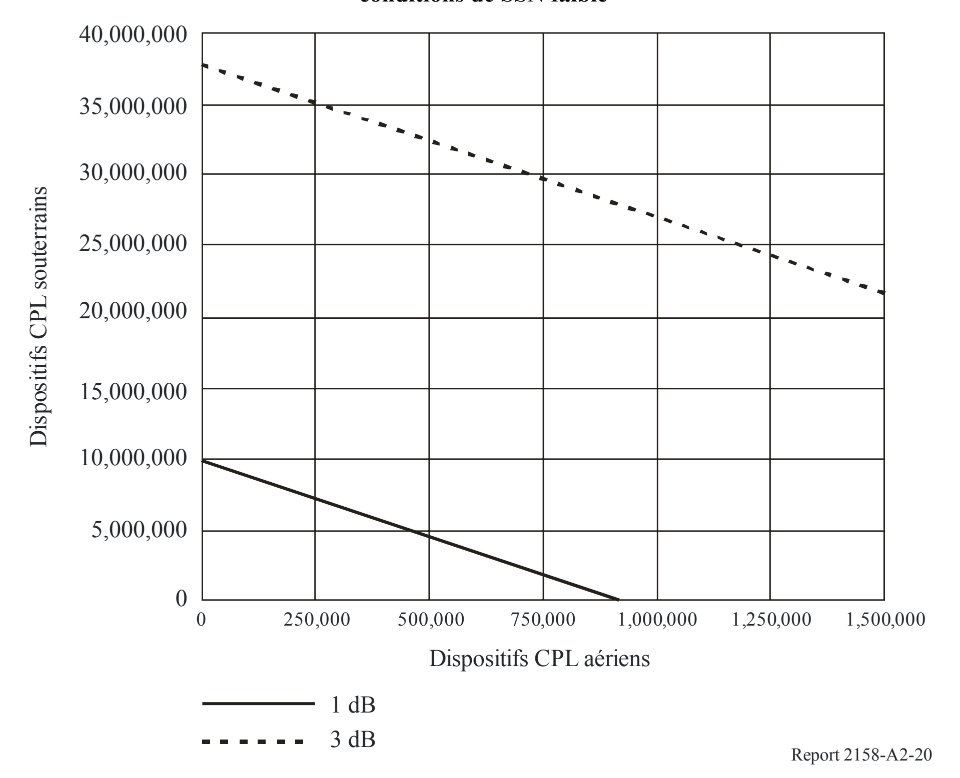


FIGURE A2-20

Comparaison du nombre de dispositifs CPL souterrains et du nombre de dispositifs CPL aériens qui produiraient la même augmentation du bruit de fond dans des conditions de SSN faible



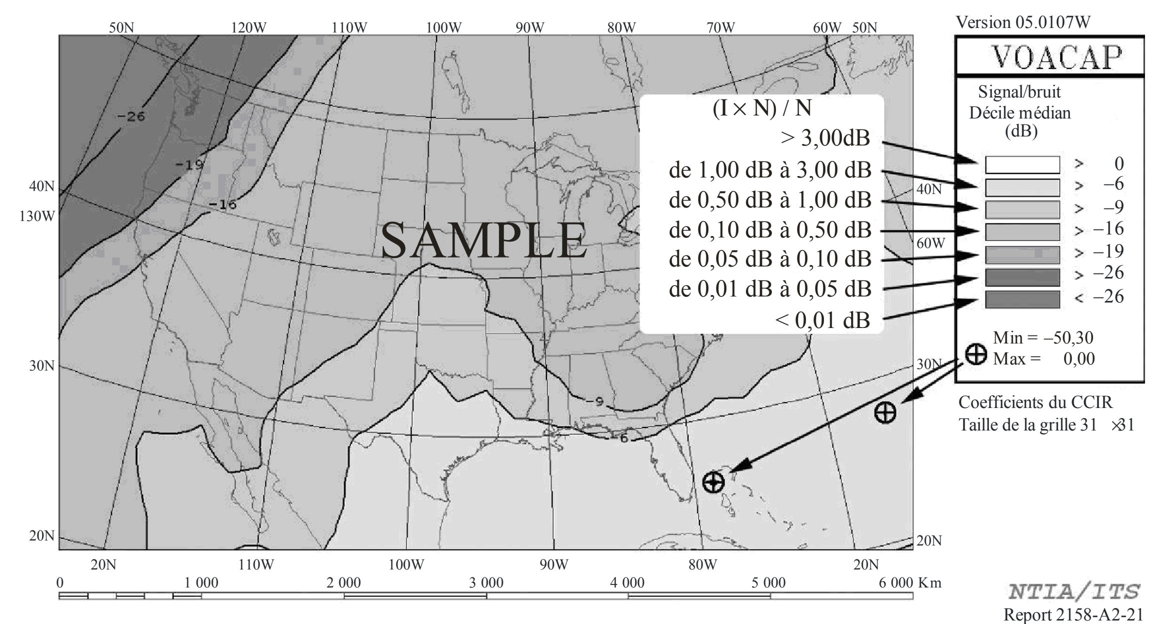
A2.4.2.5 Cartes d'agrégation ionosphérique

Les Figs A2-21 à A2-33 présentent, sous forme de cartes en courbes de niveau, les rapports «brouillages CPL cumulés/bruit» (indiqués par «signal/bruit») sur l'ensemble de la zone continentale des Etats-Unis, pour plusieurs configurations de déploiement des CPL. Ces cartes présentent les contributions de puissance cumulée pour différents ratios de dispositifs CPL aériens et souterrains, répartis en fonction de la population sur l'ensemble du territoire des Etats-Unis, de telle sorte que le SNR maximal dû à l'accumulation des signaux CPL en tout point géographique produise une augmentation du bruit de fond de 1 dB ou 3 dB environ.

Compte tenu du format de sortie du logiciel VOACAP, seuls les rapports signal/bruit sont indiqués dans les légendes des cartes en courbes de niveau. Pour faciliter l'interprétation des Figs A2-22 à A2-33, la carte type présentée à la Fig. A2-21 explicite la relation entre les valeurs figurant dans les légendes et les augmentations de bruit de fond correspondantes. Les régions les plus claires correspondent aux niveaux les plus élevés d'augmentation du bruit de fond due à l'accumulation des rayonnements CPL. Le ou les emplacements correspondant à des valeurs maximales sont repérés sur les cartes par un symbole représentant une croix entourée d'un cercle.

FIGURE A2-21

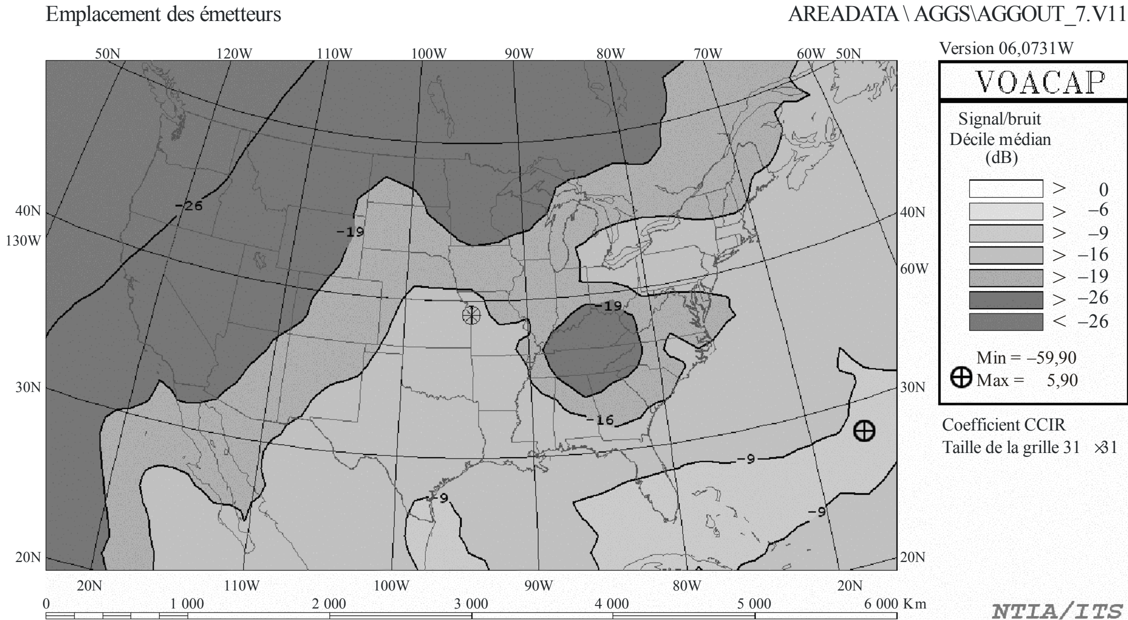
Carte type produite par VOAAREA sur laquelle on a explicité la relation entre chaque valeur de SNR figurant dans la légende et l'augmentation du bruit de fond correspondante



Report 2158-A2-21

FIGURE A2-22

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN élevé sous l'effet de 24 095 730 dispositifs souterrains et zéro dispositif aérien, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 1 dB



Report 2158-A2-22

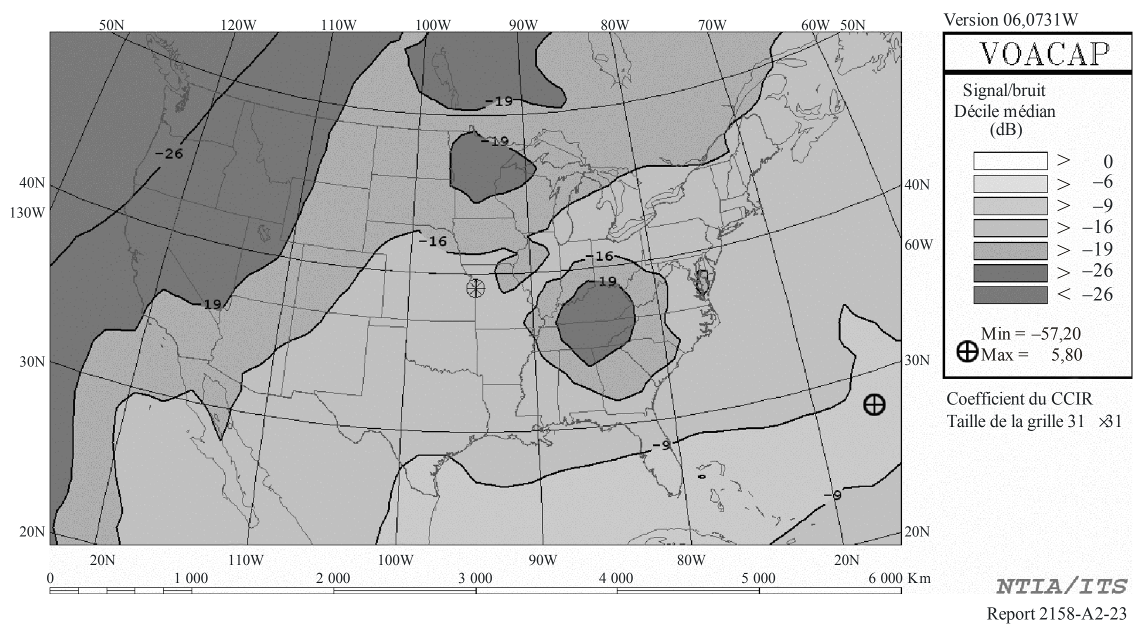
FIGURE A2-23

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN élevé sous l'effet de 12 047 865 dispositifs souterrains et 760 168 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 1 dB

15ut 30,000 MHz Nov 150ssn aérien: 760 168 souterrain: 12 047 865



SNR
AREADATA \ AGGS\AGGOUT_9.V11

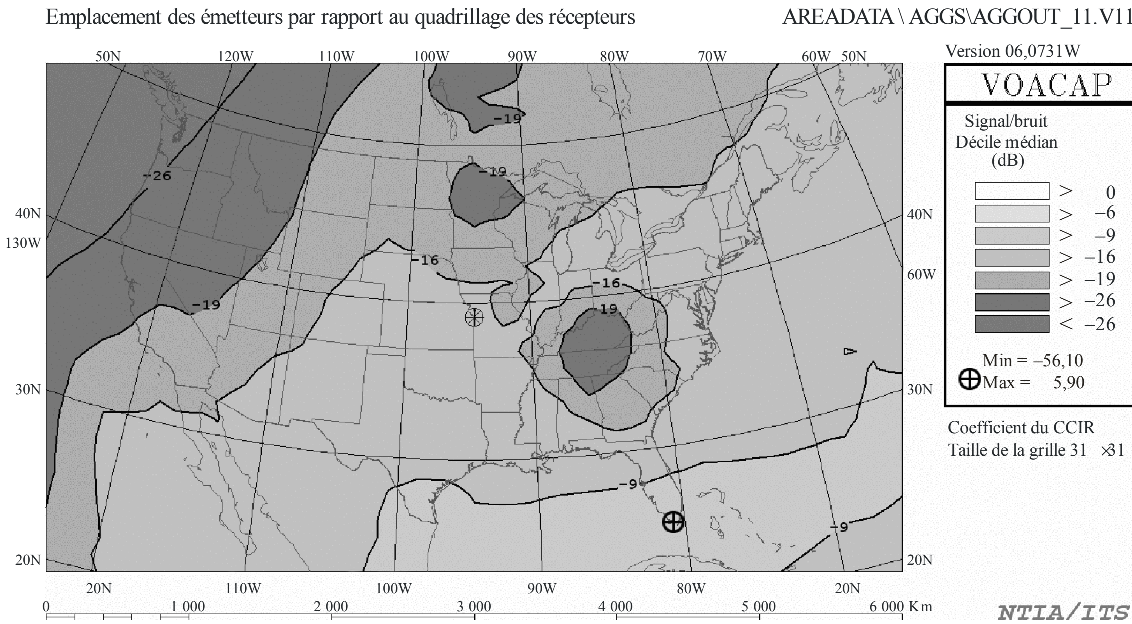


Report 2158-A2-23

FIGURE A2-24

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN élevé sous l'effet de zéro dispositif souterrain et 1 355 002 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 1 dB

15ut 30,000 MHz Nov 150ssn aérien: 1,355,002 souterrain: 0



Report 2158-A2-24

FIGURE A2-25

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN élevé sous l'effet de 93 055 084 dispositifs souterrains et zéro dispositif aérien, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 3 dB

15ut 30,000 MHz Nov 150ssn aérien: 0 souterrain: 93 055 084

SNR

Emplacement des émetteurs par rapport au quadrillage des récepteurs

AREADATA \ AGGS\AGGOUT_8.V11

Version 06,0731W

VOACAP

Signal/bruit
Décile médian
(dB)

> 0
> –6
> –9
> –16
> –19
> –26
< –26

Min = –54,00
Max = 0,00

Coefficient du CCIR
Taille de la grille 31 ×31

50N 120W 110W 100W 90W 80W 70W 60W 50N
40N 130W 30N 20N
40N 60W 30N 20N
–26 –19 –16 –9 –6
20N 110W 100W 90W 80W 20N
0 1 000 2 000 3 000 4 000 5 000 6 000 Km

NTIA/ITS

Report 2158-A2-25

FIGURE A2-26

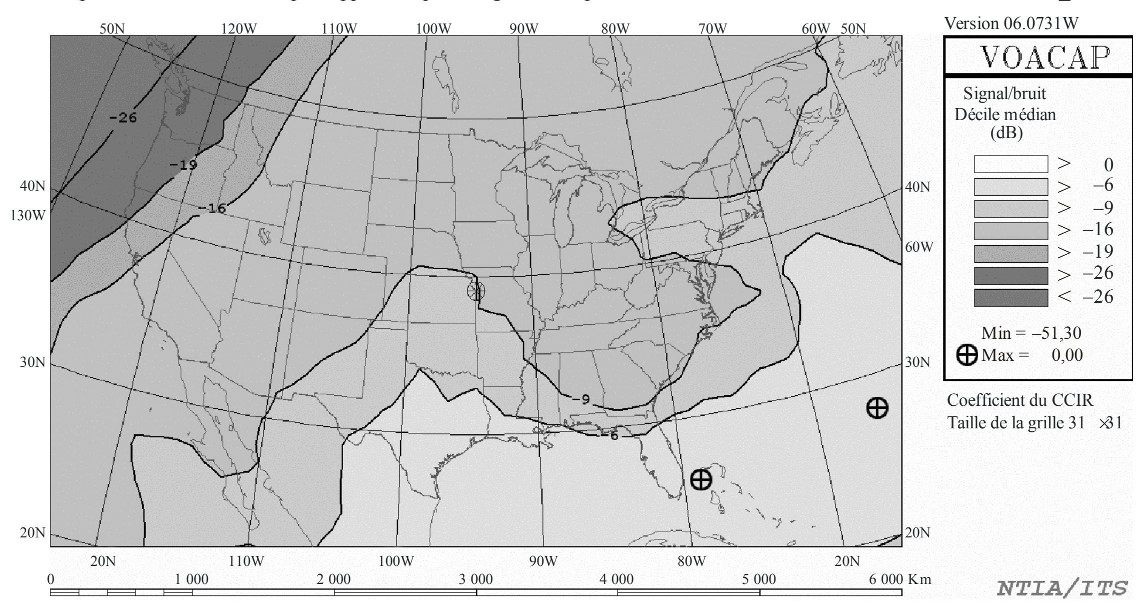
Agrégation obtenue dans des conditions de SSN élevé sous l'effet de 46 527 542 dispositifs souterrains et 2 935 689 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 3 dB

15ut 30,000 MHz Nov 150ssn aérien: 2 935 689 souterrain: 46 527 542

SNR

Emplacement des émetteurs par rapport au quadrillage des récepteurs

AREADATA \ AGGS\AGGOUT_10.V11



Report 2158-A2-26

FIGURE A2-27

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN élevé sous l'effet de zéro dispositif souterrain et 5 232 871 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 3 dB

15ut 30,000 MHz Nov 150ssn aérien: 5 232 871 souterrain: 0

SNR

Emplacement des émetteurs par rapport au quadrillage des récepteurs

AREADATA \ AGGS\AGGOUT_12.V11

Version 06,0731W

VOACAP

Signal/bruit
Décile médian
(dB)

> 0
> –6
> –9
> –16
> –19
> –26
< –26

Min = –50,20
Max = 0,00

Coefficients du CCIR
Taille de la grille 31 ×31

NTIA/ITS

Report 2158-A2-27

FIGURE A2-28

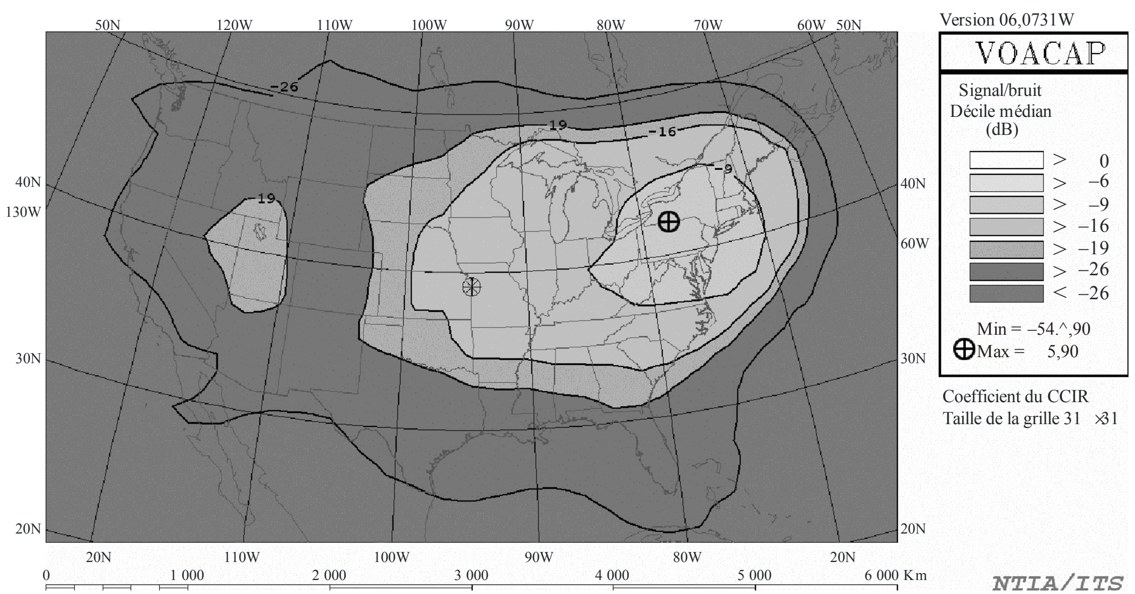
Agrégation obtenue dans des conditions de SSN faible sous l'effet de 9 816 125 dispositifs souterrains et zéro dispositif aérien, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 1 dB

15ut 6,000 MHz Dec 25ssn aérien: 0 souterrain: 9 816 125

SNR

Emplacement des émetteurs par rapport au quadrillage des récepteurs

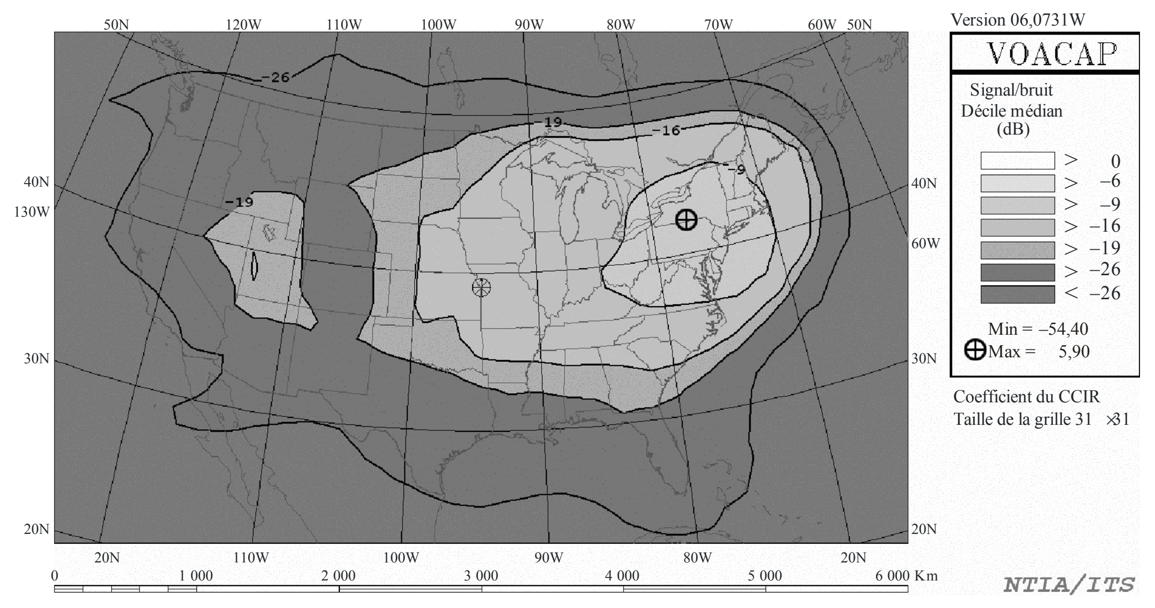
AREADATA \ AGGS\AGGOUT_1.V11



Report 2158-A2-28

FIGURE A2-29

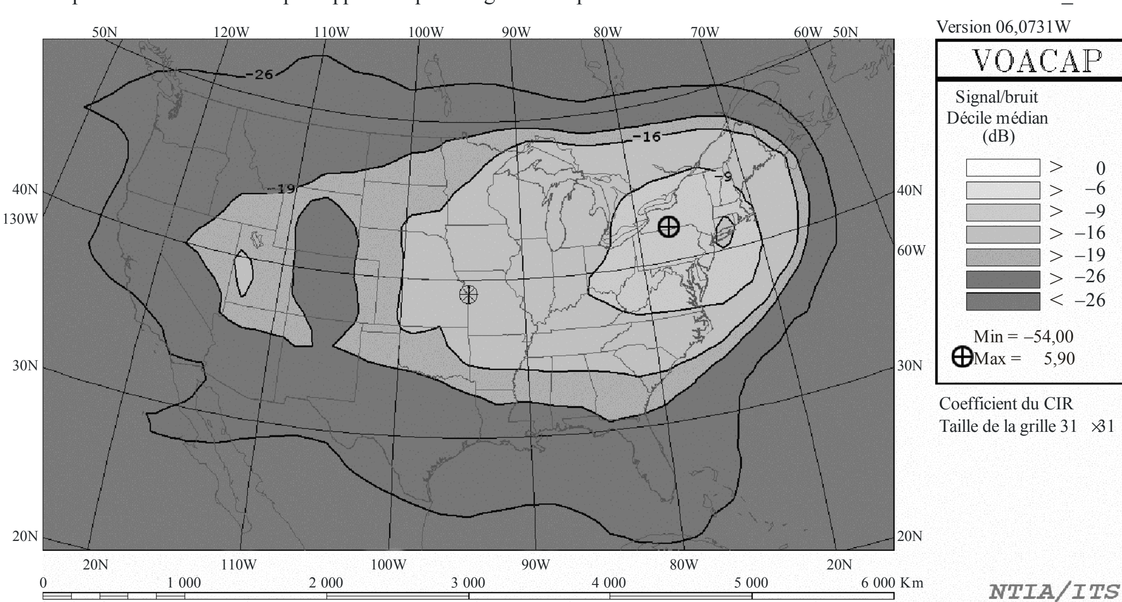
Agrégation obtenue dans des conditions de SSN faible sous l'effet de 4 908 062 dispositifs souterrains et 458 047 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 1 dB



Report 2158-A2-29

FIGURE A2-30

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN faible sous l'effet de zéro dispositif souterrain et 916 094 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 1 dB



Report 2158-A2-30

FIGURE A2-31

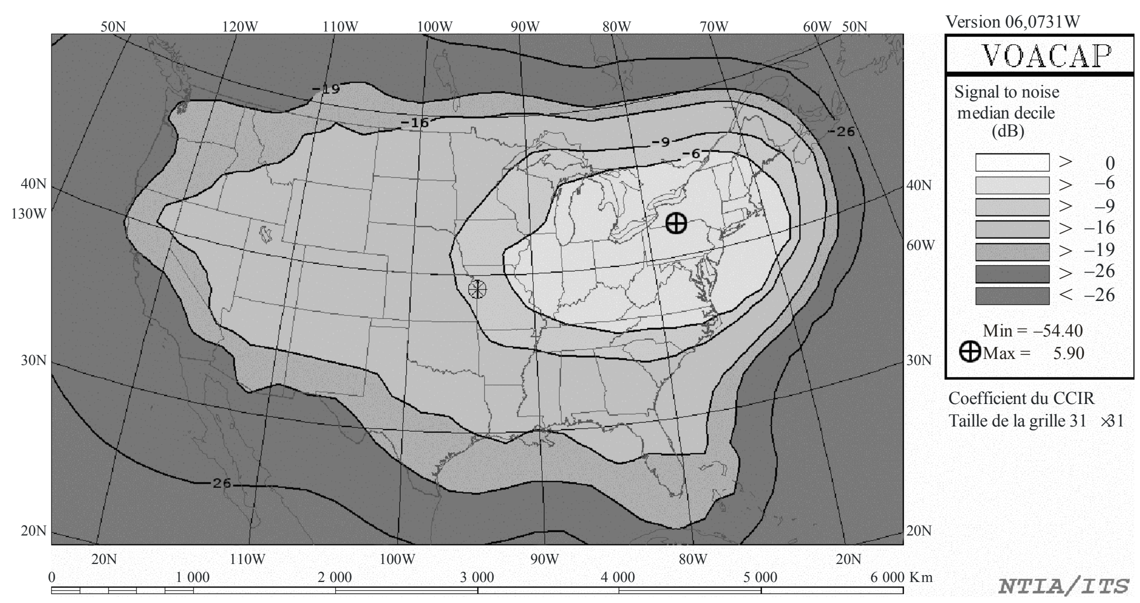
Agrégation obtenue dans des conditions de SSN faible sous l'effet de 37 908 805 dispositifs souterrains et zéro dispositif aérien, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 3 dB

15ut 6,000 MHz Dec 25ssn aérien: 0 souterrain: 37 908 805

SNR

Emplacement des émetteurs par rapport au quadrillage des récepteurs

AREADATA \ AGGS\AGGOUT_2.V11



Report 2158-A2-31

FIGURE A2-32

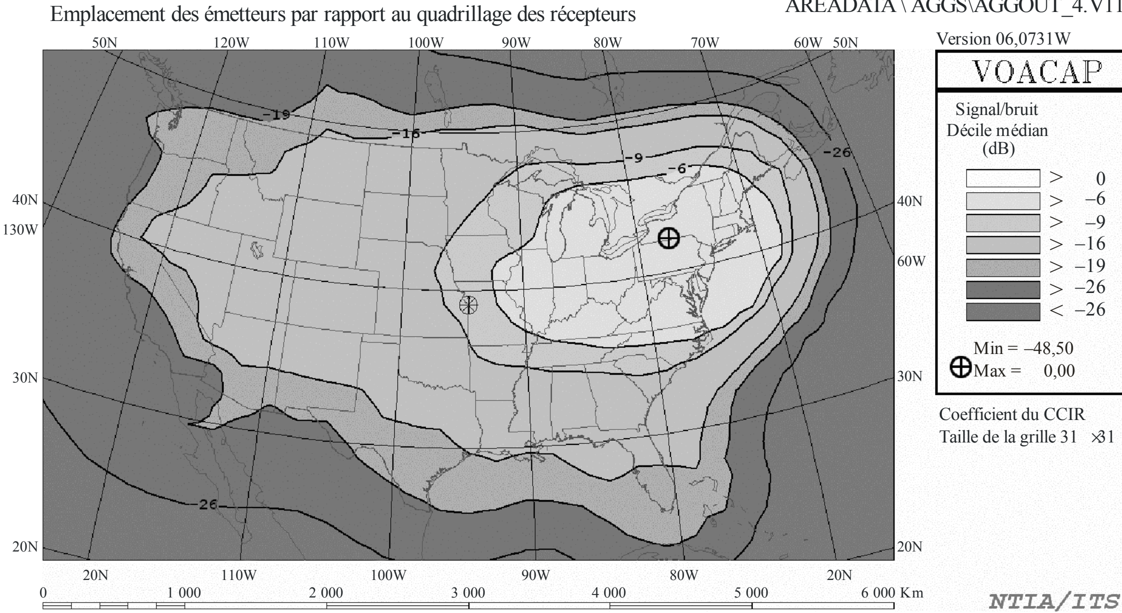
Agrégation obtenue dans des conditions de SSN faible sous l'effet de 18 954 402 dispositifs souterrains et 1 768 927 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 3 dB

15ut 6,000 MHz Dec 25ssn aérien: 1 768 927 souterrain: 18 954 402

SNR

Emplacement des émetteurs par rapport au quadrillage des récepteurs

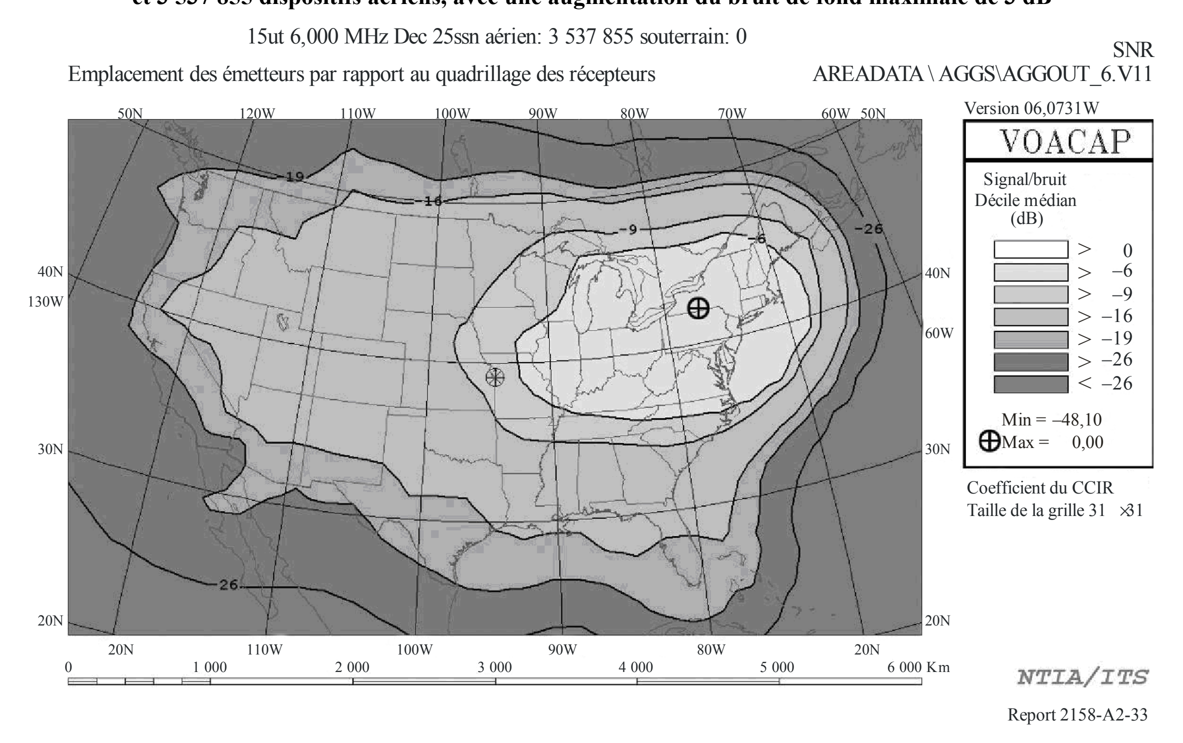
AREADATA \ AGGS\AGGOUT_4.V11



Report 2158-A2-32

FIGURE A2-33

Agrégation obtenue dans des conditions de SSN faible sous l'effet de zéro dispositif souterrain et 3 537 855 dispositifs aériens, avec une augmentation du bruit de fond maximale de 3 dB



Report 2158-A2-33

Les exemples d'agrégation des Figs A2-22 à A2-33 illustrent les deux cas (activité solaire au minimum du cycle et activité solaire au maximum) correspondant au plus petit nombre de dispositifs permettant d'atteindre les seuils indiqués, et ce en quelque point géographique et pour l'ensemble des conditions d'horaires et de fréquences simulées. Comme le montrent ces figures, dans ces conditions de «meilleure propagation/bruit le plus faible» et compte tenu des hypothèses émises dans cette étude, il serait nécessaire de déployer sur l'ensemble du pays plus de 916 000 dispositifs CPL aériens pour produire des augmentations de bruit de fond de 1 dB en tout point géographique, ce qui est sensiblement supérieur aux 705 000 dispositifs CPL prévus par le modèle de déploiement de la NTIA pour connecter 100% des ménages vivant en zone urbaine aux Etats-Unis. Il serait en outre possible de déployer beaucoup plus de dispositifs sans atteindre aucun des deux seuils de 1 dB et 3 dB en déployant un pourcentage significatif de lignes électriques souterraines.

Dans la grande majorité des cas modélisés (autres horaires, autres mois de l'année et autres fréquences), il est nécessaire de déployer beaucoup plus de dispositifs, à la fois souterrains et aériens, pour produire les augmentations de bruit de fond spécifiées.

A2.4.2.6 Résumé

La NTIA a modélisé deux structures de ligne électrique et mené des études d'agrégation approfondies à l'aide du logiciel de propagation VOAAREA pour déterminer dans quelle mesure des signaux CPL propagés par l'ionosphère peuvent brouiller, de façon préjudiciable, les systèmes de radiocommunication gouvernementaux des Etats-Unis dans la bande de fréquences 1,7-30 MHz.

Les résultats de la simulation menée par les Etats-Unis concernant le déploiement de systèmes CPL de type *Access* sur des lignes électriques aériennes de moyenne tension dans la bande de fréquences 1,7-30 MHz montrent que, pour un déploiement à grande échelle de dispositifs CPL aériens (de sorte que 100% des ménages en zone urbaine aux Etats-Unis puissent accéder aux services CPL) et compte tenu des hypothèses émises dans cette étude, l'augmentation du bruit de fond devrait être inférieure à 1 dB dans le cas le plus défavorable des conditions de propagation. A noter qu'en

réalité, environ 20% des lignes électriques de moyenne tension sont enterrées et que de nombreux systèmes CPL fonctionnent dans la bande des fréquences métriques. Selon les résultats de cette étude, un déploiement à grande échelle de systèmes CPL de type *Access* aux Etats-Unis ne devrait pas poser de problème aux systèmes de radiocommunication gouvernementaux du pays (service mobile terrestre et service fixe modélisés par des doublets quart d'onde) fonctionnant dans la bande de fréquences 1,7-30 MHz en ce qui concerne les risques de brouillages dus à la propagation par l'onde ionosphérique et par l'agrégation des signaux.

A2.4.3 Résultats des calculs de brouillages cumulés causés par les systèmes CPL sur la propagation par l'onde ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques

A2.4.3.1 Introduction

La présente section donne des exemples de calcul du champ électrique cumulé produit par des systèmes CPL du fait de la propagation par l'onde ionosphérique. Les calculs reposent sur la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.533 – Méthode pour la prévision de la propagation des ondes décamétriques.

Dans ces calculs, on pose les hypothèses suivantes:

– Le territoire du Japon est divisé en neuf zones, chacune dotée d'une source de rayonnement fictive dont la puissance est proportionnelle au nombre total de systèmes CPL pris comme hypothèse.
– Le nombre total de systèmes CPL est de 1,5 x 10^7, ce qui correspond à une couverture de 30% des ménages.
– Le facteur d'utilisation est fixé à 100% (tous les systèmes CPL sont allumés et fonctionnent, mais, dans un système donné, un seul modem CPL à la fois produit de l'énergie en sortie).

A2.4.3.2 Calcul du champ cumulé produit par les systèmes CPL et propagé par l'onde ionosphérique

Procédures de calcul

1 *Puissance rayonnée par un seul système CPL*

La puissance rayonnée a été évaluée comme suit:

– pour un modem CPL, la puissance rayonnée par les lignes électriques est calculée à partir d'une puissance de signal de –60 dBm/Hz (valeur quadratique moyenne) et de l'affaiblissement de conversion longitudinale (ACL) des lignes électriques fixé à 30 dB;
– de plus, compte tenu de la largeur de bande d'un système de réception brouillé, la puissance de rayonnement due à un seul système CPL est évaluée pour les bandes du service radioélectrique, comme indiqué au Tableau A2-5;
– pour déterminer ces valeurs, on a utilisé la formule suivante:

  puissance rayonnée (dBW) = puissance du signal (dBm/Hz) –30 + 10 log (largeur de bande (Hz)) – ACL (dB);
– on suppose que les points de réception sont suffisamment éloignés des systèmes CPL pour que la source de rayonnement puisse être considérée comme une source ponctuelle.

TABLEAU A2-5

Puissance de rayonnement d'un seul système CPL

	Bande de fréquences	Puissance de rayonnement
Radioastronomie	Bande des 13 MHz (fréquence centrale: 13,385 MHz)	–73,0 dBW (valeur quadratique moyenne, largeur de bande 50 kHz)
	Bande des 25 MHz (fréquence centrale: 25,610 MHz)	–69,2 dBW (valeur quadratique moyenne, largeur de bande 120 kHz)
Radioamateur	Bande des 3,5 MHz (fréquence de calcul: 3,538 MHz)	–86,2 dBW (valeur quadratique moyenne, largeur de bande 2,4 kHz)
	Bande des 7 MHz (fréquence de calcul: 7,050 MHz)	–86,2 dBW (valeur quadratique moyenne, largeur de bande 2,4 kHz)

2 *Approche cumulative des systèmes CPL répartis*

Dans les calculs, le territoire du Japon est divisé en neuf zones (voir Tableau A2-6), chacune étant dotée d'une source de rayonnement fictive dont la puissance est évaluée à partir de la formule suivante:

Puissance de rayonnement d'une source fictive dans une zone donnée (dBW)

= puissance rayonnée par un seul système CPL (dBW) + 10 log (nombre de systèmes CPL) – effet d'écran (dB)

où:

Nombre de systèmes CPL = nombre de ménages dans la zone considérée * taux de pénétration CPL

avec:

Nombre de ménages déterminé à partir de données gouvernementales (en date de mars 2004) concernant la zone considérée:

Taux de pénétration CPL: évalué à partir du taux de pénétration du service à large bande au niveau des villes et des préfectures (en date de mars 2005) dans l'hypothèse d'une moyenne nationale de 30%.

Effet d'écran: 0 dB par hypothèse (pas d'effet).

Dans l'analyse du cas le plus défavorable, on a considéré que le facteur d'utilisation de chaque modem CPL était de 100%, ce qui signifie que tous les modems CPL sont allumés et fonctionnent.

3 *Calcul de la distribution du champ cumulé propagé par l'onde ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques*

La distribution du champ électrique (valeur médiane) émis par un total de $1{,}5 \times 10^7$ systèmes CPL et propagé par l'onde ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques a été calculée de la façon suivante:

– pour chaque zone considérée, la distribution du champ électrique émis par une source de rayonnement fictive a été calculée à partir de la propagation des ondes décamétriques par l'onde ionosphérique;

– les neuf résultats ont été additionnés dans le domaine des puissances.

Calcul proprement dit effectué à partir du modèle de propagation décrit dans la Recommandation UIT-R P.533

Le calcul de la distribution du champ a été effectué à l'aide du logiciel libre RECAREA[56], logiciel du domaine public mis à disposition par la Commission d'études 3 des radiocommunications, avec les paramètres suivants:

a) *Puissance de rayonnement*

En raison d'une contrainte imposée par le logiciel, les calculs ont été effectués pour certains niveaux de puissance de rayonnement supérieurs à 0 dBW. Les résultats ont ensuite été corrigés en fonction des puissances de rayonnement figurant dans les Tableaux A2-5 et A2-6.

b) *Antenne de transmission*

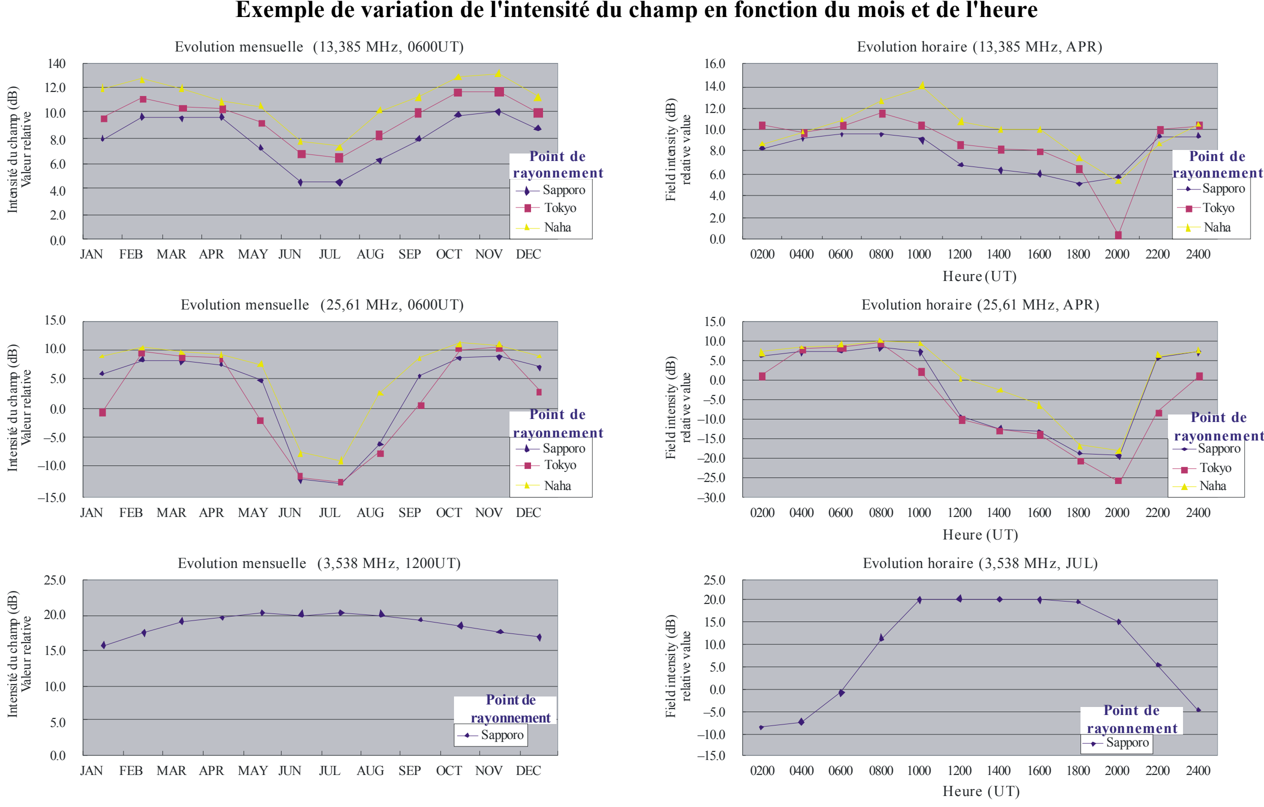
L'antenne choisie était de type isotrope.

c) *Conditions de propagation dans l'ionosphère*

Diverses caractéristiques de l'ionosphère évoluent selon le mois et l'horaire. De ce fait, le champ électrique et sa distribution évoluent également. Le champ électrique maximal présent dans la zone de traçage choisie en f) varie en fonction du mois et de l'horaire utilisés pour les calculs, comme indiqué à la Fig. A2-34. Lors du calcul, les paramètres «mois: avril, horaire: 0600UT» ont été utilisés, ce qui correspond approximativement au champ électrique maximal.

FIGURE A2-34

Exemple de variation de l'intensité du champ en fonction du mois et de l'heure



---

[56] Ce logiciel est téléchargeable à partir de l'adresse http://elbert.its.bldrdoc.gov/pc_hf/hfwin32.html.

d) *SSN (nombre de taches solaires)*

La Fig. A2-35 présente un exemple de variation du champ électrique maximal pour différentes valeurs de SSN. Pour le calcul, SSN a été fixé à 100. (Activité solaire relativement intense)

e) *Antenne de réception / largeur de bande du récepteur*

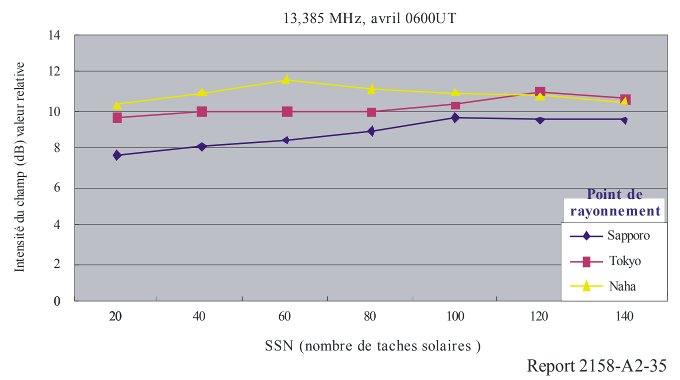
Pour le calcul du champ électrique, ce paramètre est sans objet.

f) *Zone de traçage*

Le point de référence du tracé est Tokyo. La zone de traçage couvre une partie du Japon: 700 km à l'est, 1 300 km à l'ouest, 1 200 km au nord et 1 000 km au sud du point de référence.

FIGURE A2-35

Exemple de variation de l'intensité du champ en fonction du SSN



Report 2158-A2-35

TABLEAU A2-6

Puissance de rayonnement des sources fictives

	Zone	**Emplacement de la source fictive**	**Nombre de foyers (x 10^4)**	**Pénétration CPL**	**Nombre de systèmes CPL (x 10^4)**	**Puissance de rayonnement de la source fictive (dBW)**
1	Hokkaido	Sapporo (43,06N、141,33E)	252	20%	50,4	Bande des 13 MHz: –16,0 Bande des 25 MHz: –12,2 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –29,2
2	Touhoku	Sendai (38,26N、140,90E)	341	25%	85,3	Bande des 13 MHz: –13,7 Bande des 25 MHz: –9,9 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –26,9
3	Kanto	Tokyo (35,67N、139,77E)	1 717	35%	600,9	Bande des 13 MHz: –5,2 Bande des 25 MHz: –1,4 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –8,4
4	Shinetsu, Hokuriku	Kanazawa (36,59N、136,63E)	263	25%	65,8	Bande des 13 MHz: –14,8 Bande des 25 MHz: –11,0 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –28,0

TABLEAU A2-6 (*fin*)

	Zone	Emplacement de la source fictive	Nombre de foyers (x 10^4)	Pénétration CPL	Nombre de systèmes CPL (x 10^4)	Puissance de rayonnement de la source fictive (dBW)
5	Toukai	Nagoya (35,17N、136,97E)	536	35%	187,5	Bande des 13 MHz: –10,3 Bande des 25 MHz: –6,5 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –23,5
6	Kinki	Osaka (34,68N、135,52E)	829	30%	248,7	Bande des 13 MHz: –9,0 Bande des 25 MHz: –5,2 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –22,2
7	Chugoku, Shikoku	Hiroshima (34,40N、132,46E)	464	25%	116,0	Bande des 13 MHz: –12,4 Bande des 25 MHz: –8,6 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –25,6
8	Kyushu	Fukuoka (33,58N、130,38E)	531	25%	132,9	Bande des 13 MHz: –11,8 Bande des 25 MHz: –8,0 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –25,0
9	Okinawa	Naha (26,21N、127,69E)	50	20%	10,0	Bande des 13 MHz: –23,0 Bande des 25 MHz: –19,2 Bandes des 3,5 MHz/7 MHz: –36,2

A2.4.3.3 Résultat des calculs

La Fig. A2-36 présente les résultats du calcul du rayonnement causé par un seul système CPL. Le champ électrique résultant de la propagation ionosphérique peut présenter un point de valeur maximale à une grande distance du point de rayonnement, ce point étant fonction du mois, de l'heure, de la fréquence, etc.

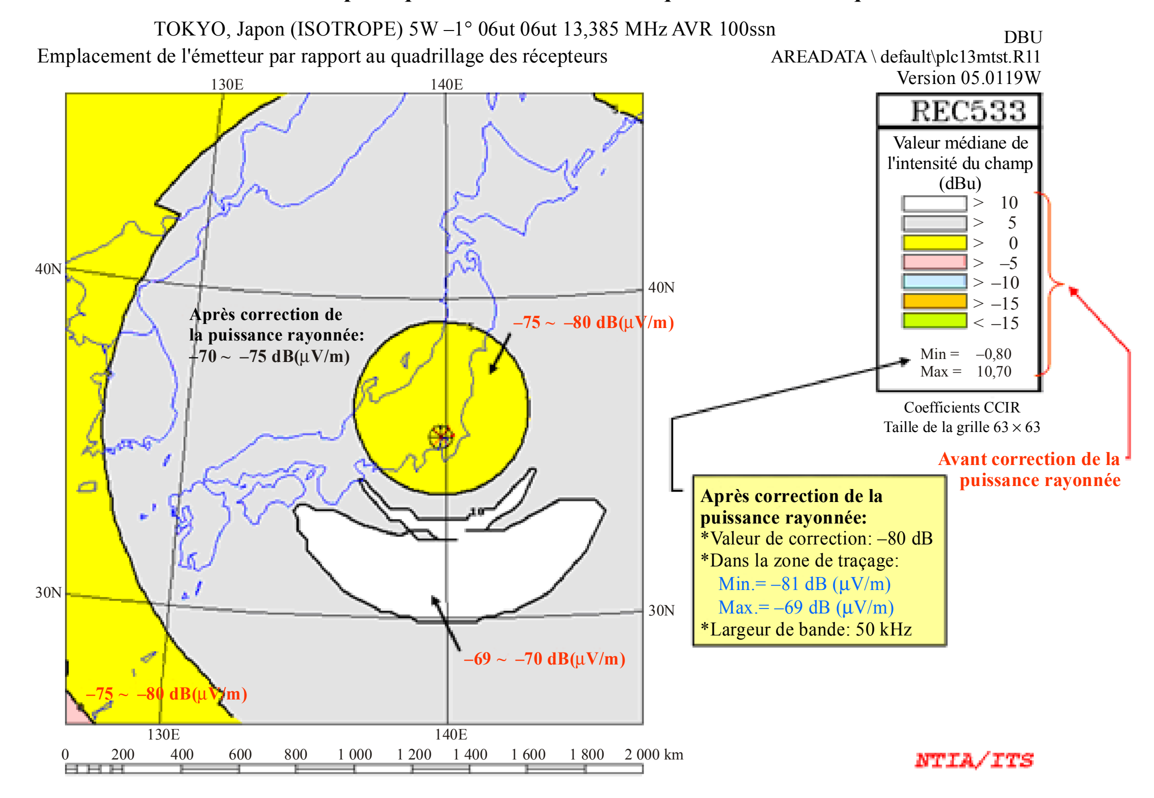
Cela étant, la valeur absolue du champ électrique causé par un seul système CPL est extrêmement faible. En outre, à mesure que la distance par rapport au point de rayonnement augmente, l'intensité du champ électrique brouilleur décroît, ainsi que le montre la Fig. A2-37.

Les Figs A2-38 et A2-39 montrent les résultats du calcul de la distribution du champ électrique cumulé (valeur médiane) causé par un total de $1{,}5 \times 10^7$ systèmes CPL au Japon.

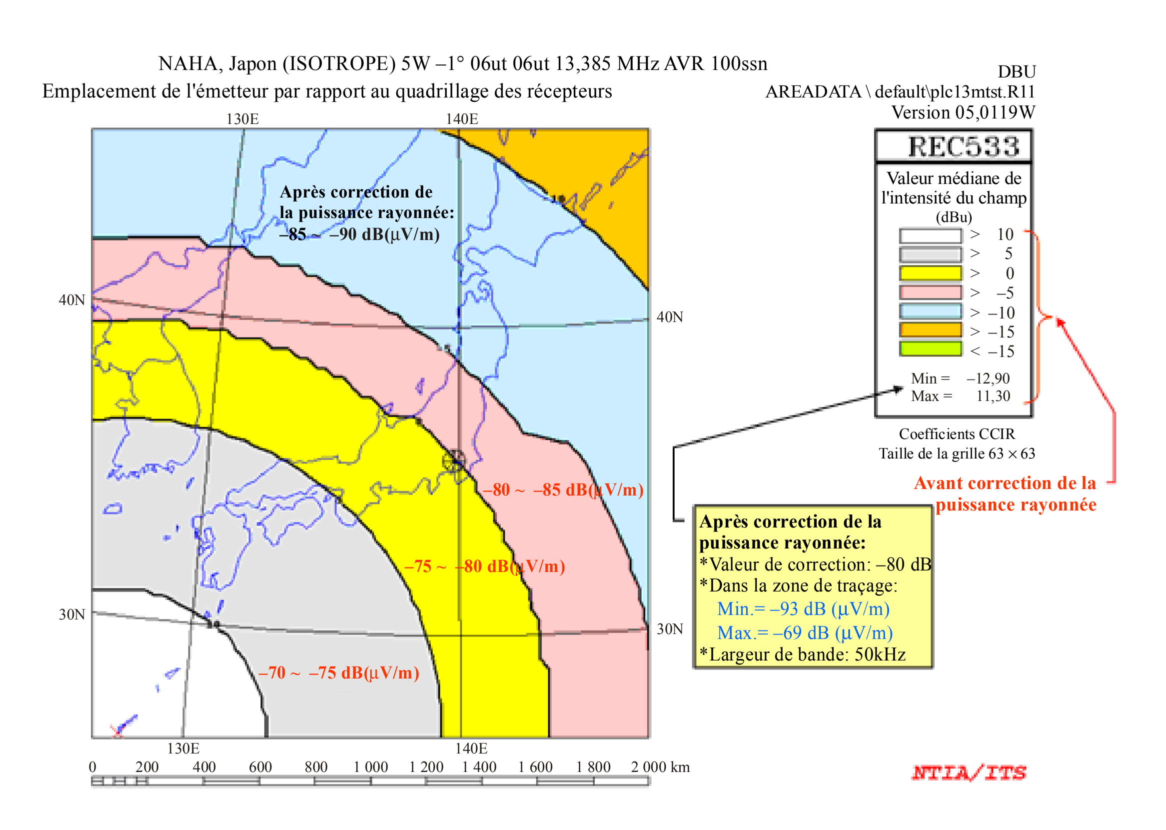
Comme dans le cas d'un seul système CPL, les résultats du calcul montrent que le champ électrique résultant de la propagation ionosphérique peut présenter un point de valeur maximale à une grande distance du point de rayonnement. Cela étant, on constate que l'intensité du champ électrique cumulé produit par tous les systèmes CPL est faible et inférieur au niveau de bruit en zone rurale.

FIGURE A2-36

Exemple de distribution du champ produit par un seul système CPL par propagation ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques



a) Bande des 13 MHz, point de rayonnement: Tokyo

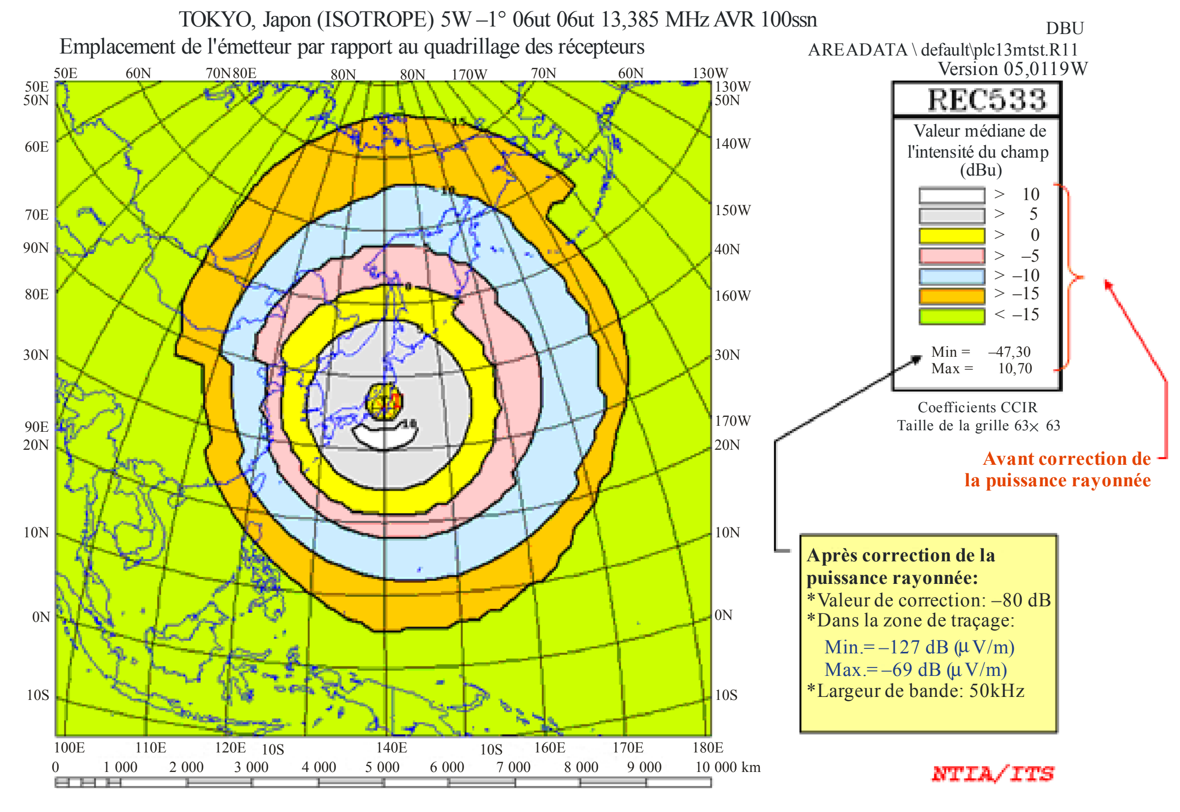


b) Bande des 13 MHz, point de rayonnement: Naha

Report 2158-A2-36

FIGURE A2-37

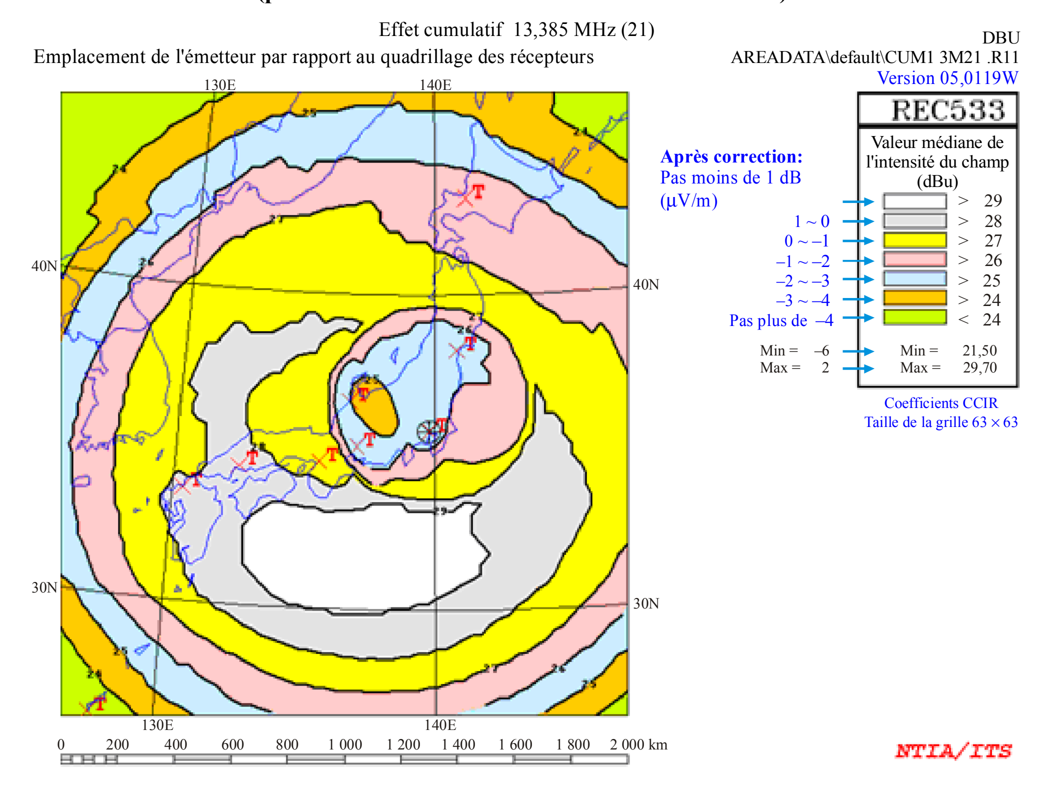
Exemple de distribution du champ produit par un seul système CPL par propagation ionosphérique dans la bande des fréquences décamétriques (bande des 13 MHz, point de rayonnement: Tokyo)



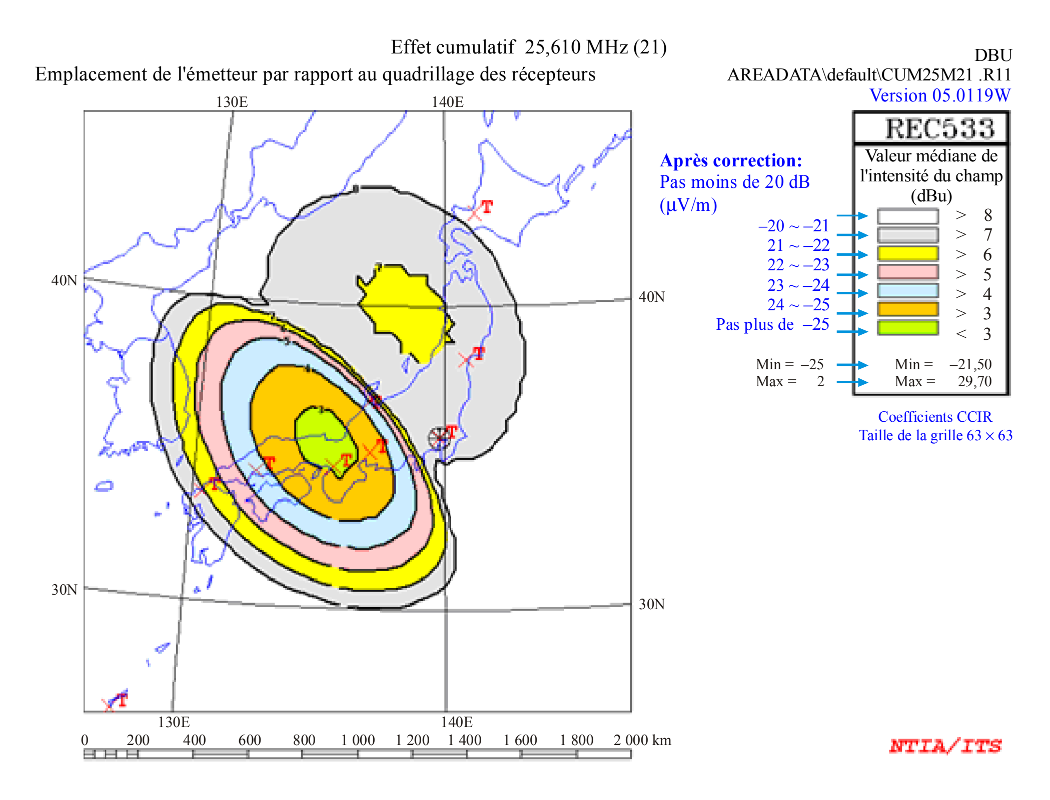
Report 2158-A2-37

FIGURE A2-38

Exemple de distribution du champ cumulé des ondes ionosphériques rayonnées par l'ensemble des systèmes CPL dans la bande des fréquences décamétriques (pour la bande des 13 MHz et la bande des 25 MHz)



a) Onde ionosphérique: bande des 13 MHz, largeur de bande: 50 kHz

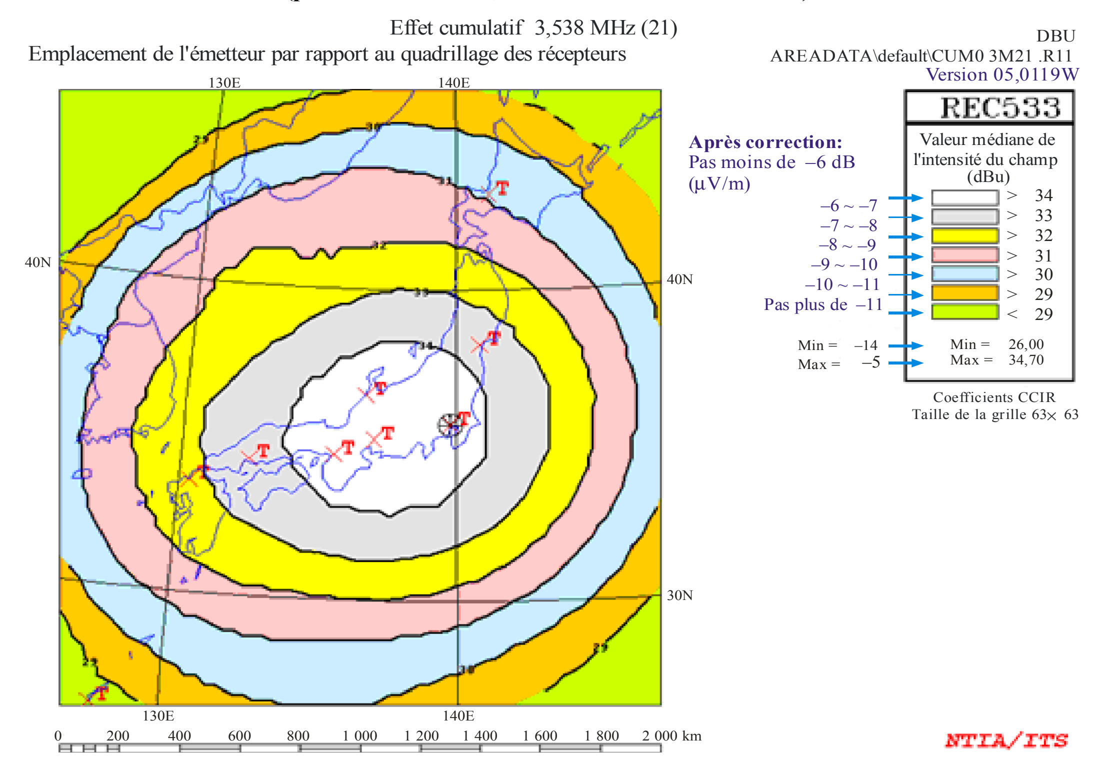


b) Onde ionosphérique: bande des 25 MHz, largeur de bande: 120 kHz

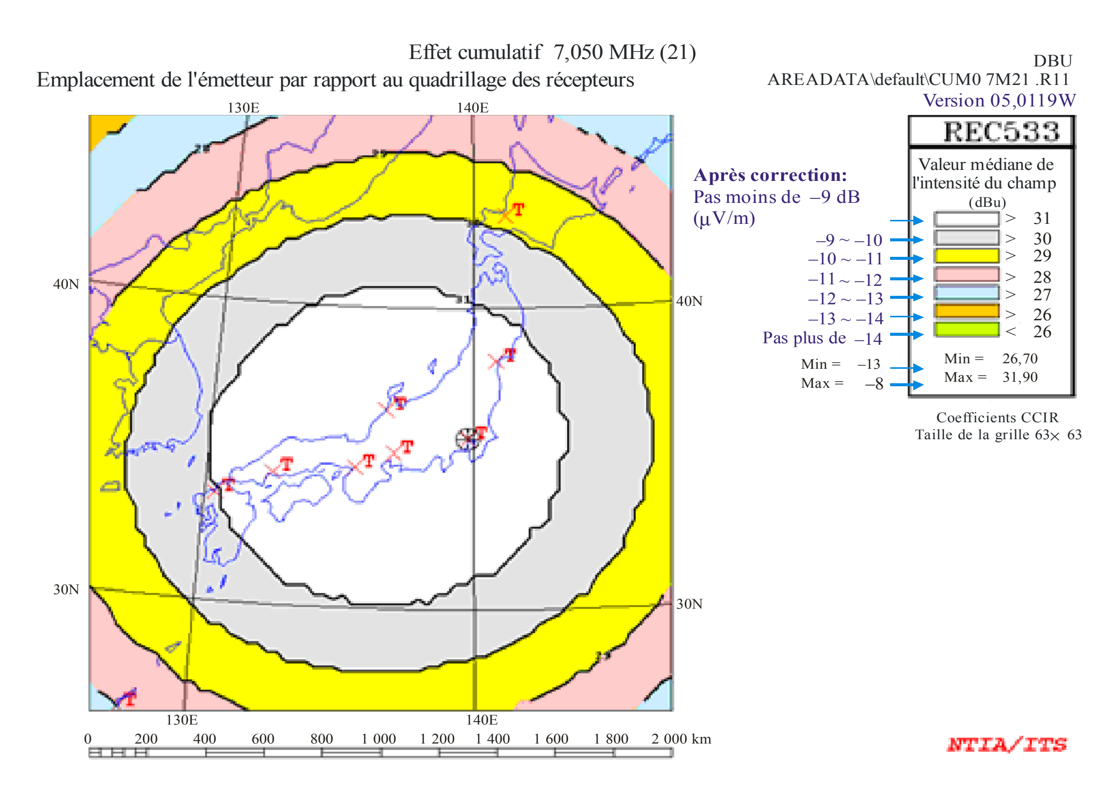
Report 2158-A2-38

FIGURE A2-39

Exemple de distribution du champ cumulé des ondes ionosphériques rayonnées par l'ensemble des systèmes CPL dans la bande des fréquences décamétriques (pour la bande des 3,5 MHz et la bande des 7 MHz)



a) Onde ionosphérique: bande des 3 MHz, largeur de bande: 2,4 kHz



b) Onde ionosphérique: bande des 7 MHz, largeur de bande: 2,4 kHz

Report 2158-A2-39

A2.4.4 Résultats de l'étude de compatibilité entre les observations de radioastronomie dans la bande des fréquences décamétriques et les brouillages cumulés causés par des systèmes CPL de type *Indoor* via l'onde ionosphérique dans la même bande de fréquences

A2.4.4.1 Introduction

Les bandes de fréquences décamétriques attribuées au service de radioastronomie à titre primaire sont: 13,36-13,41 MHz et 25,55-25,67 MHz. Les niveaux de seuil de brouillage préjudiciables aux observations de radioastronomie dans ces bandes de fréquences, exprimés en termes d'intensité de champ électrique dans le Rapport UIT-R RA.2131, sont respectivement de −55,2 dB(μV/m) pour la bande des 13 MHz et de –53,2 dB(μV/m) pour la bande des 25 MHz.

A2.4.4.2 Résultats des calculs

La Fig. A2-38 présente les résultats du calcul du rayonnement causé par un seul système CPL. Le champ électrique résultant de la propagation ionosphérique peut présenter un point de valeur maximale à une grande distance du point de rayonnement, ce point étant fonction du mois, de l'heure, de la fréquence, etc. La Fig. A2-39 illustre les résultats du calcul de la distribution du champ électrique cumulé (valeur médiane) causé par un total de $1,5 \times 10^7$ systèmes CPL. Comme dans le cas d'un seul système CPL, les résultats du calcul montrent que le champ électrique résultant de la propagation ionosphérique peut présenter un point de valeur maximale à une grande distance du point de rayonnement.

Dans la Fig. A2-39, les intensités maximales du champ électrique sont de 2 dB(μV/m) pour la bande des 13 MHz et de –2 dB(μV/m) pour la bande des 25 MHz, ce qui est très supérieur au niveau de seuil de brouillage préjudiciable aux observations de radioastronomie dans ces bandes, à savoir –55,2 dB(μV/m) pour la bande des 13 MHz et –53,2 dB(μV/m) pour la bande des 25 MHz. Les différences sont donc d'environ 57 dB pour la bande des 13 MHz et d'environ 51 dB pour la bande des 25 MHz. Etant donné que les intensités de champ calculées sont à peu près proportionnelles à la puissance totale rayonnée, il serait possible d'annuler ces écarts en passant le nombre de systèmes CPL de $1,5 \times 10^7$ à 30. Cette solution n'est cependant pas réaliste.

A2.4.4.3 Mesures d'atténuation envisageables pour protéger le service de radioastronomie dans la bande des fréquences décamétriques

On l'a constaté, le partage de fréquences entre les observations de radioastronomie dans la bande des fréquences décamétriques et des systèmes CPL en grand nombre n'est pas envisageable. Il serait néanmoins possible de prendre des mesures d'atténuation pour éviter les brouillages préjudiciables aux observations de radioastronomie dans cette bande de fréquences, à savoir:

– mettre en place des filtres coupe-bande fixes, de sorte qu'un système CPL ne puisse pas utiliser les bandes de fréquences attribuées au service de radioastronomie dans la bande HF; ou
– diminuer de plus de 50 dB la puissance rayonnée par un seul système CPL.

Etant donné que les observations de radioastronomie sont relativement sensibles et qu'elles ne peuvent échapper au rayonnement causé par les systèmes CPL, il conviendrait de réduire en permanence la densité spectrale de puissance des dispositifs CPL (c'est-à-dire de prévoir un filtrage coupe-bande permanent) dans les bandes de fréquences attribuées au service de radioastronomie.

A2.5 Résultats expérimentaux de l'essai d'évaluation subjective concernant la réception de radiodiffusion analogique dans la bande des fréquences décamétriques en présence de brouillages causés par des CPL

Cette section présente les résultats de l'essai d'évaluation subjective mené au Japon pour évaluer les brouillages causés par des CPL sur la réception de radiodiffusion dans la bande des fréquences décamétriques. Cet essai a été mené en deux étapes: 1) acquisition d'échantillons audio reçus lors d'une radiodiffusion HF brouillée par des systèmes CPL, 2) essai d'évaluation subjective à partir de ces échantillons. Pour acquérir les échantillons audio, un signal HF modulé par des signaux audio (modulation de 30%) a été généré à 6,055 MHz dans une chambre blindée (cellule GTEM). Le signal de radiodiffusion HF, le bruit CPL et le bruit gaussien ont été générés à l'intérieur de la cellule isolée GTEM.

Deux types de modems CPL ont été utilisés: l'un mettant en œuvre la technique de modulation à étalement de spectre et l'autre la modulation MROF.

Les fréquences utilisées pour l'essai correspondent aux fréquences à mi-bande de trois bandes utilisées par Nikkei Radio Broadcasting Co.

L'essai d'évaluation subjective a été mené selon la méthode DSIS (double stimulus utilisant une échelle de dégradation) décrite dans la Recommandation UIT-R BS.1284.

Les essais ont été effectués aux dates et emplacements suivants:

– 29 août 2005 (acquisition des échantillons audio): NICT
– 15 septembre 2005 (essais d'évaluation subjective): NHK STRL

A2.5.1 Méthodes mises en œuvre lors de l'essai

A2.5.1.1 Acquisition des échantillons audio

La Fig. A2-40 et le Tableau A2-7 présentent respectivement la configuration et les conditions de l'essai.

Les trois signaux suivants ont été multiplexés et injectés dans une cellule TEM:

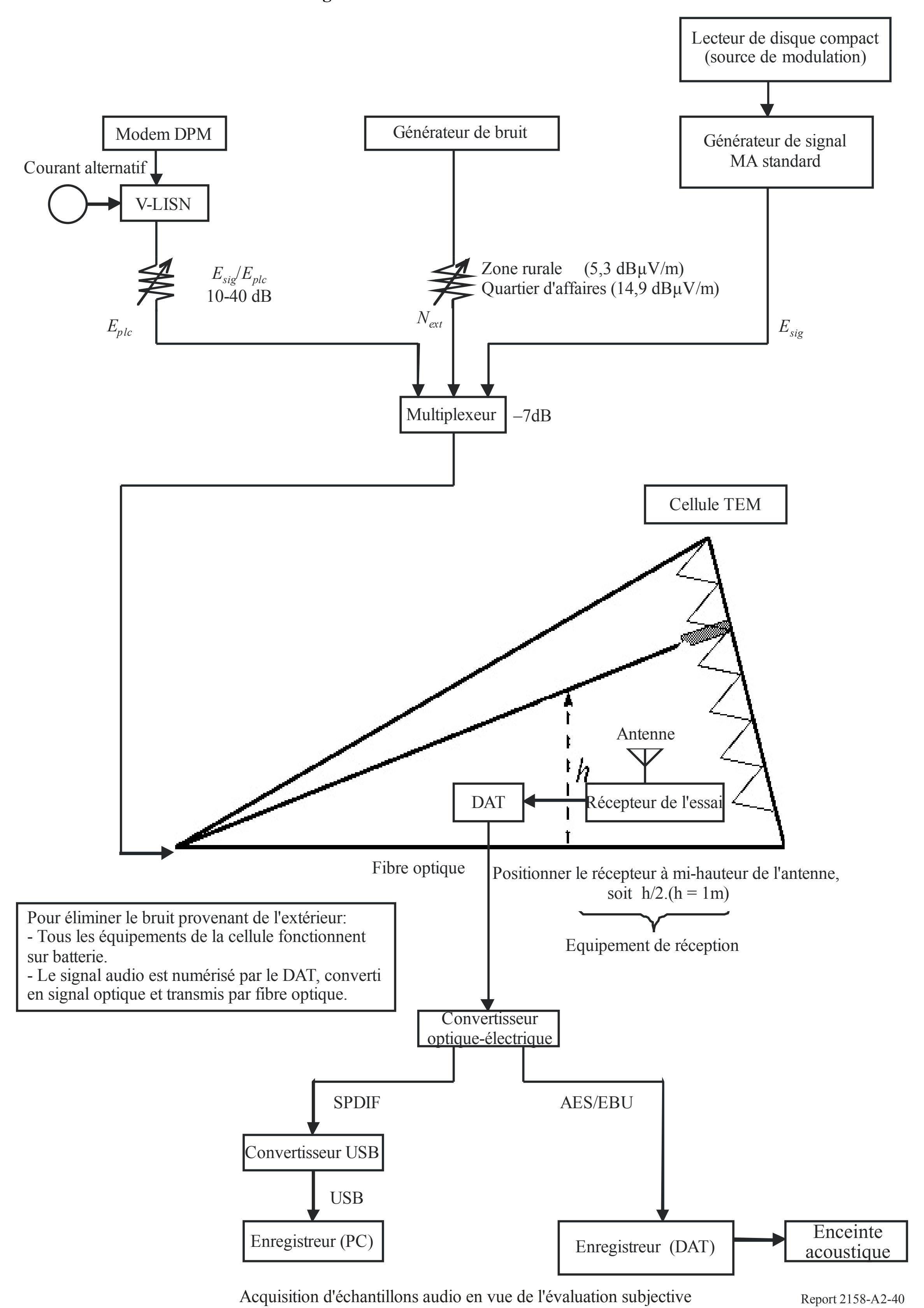
– signal d'un modem CPL via un V-LISN (réseau de stabilisation d'impédance de ligne);
– sortie d'un générateur de bruit pour simuler le bruit artificiel;
– sortie d'un générateur de signal MA standard pour simuler le signal de radiodiffusion HF (modulation de 30%).

L'intensité du champ du bruit artificiel (N_{ext}) a été fixée à une valeur correspondant à la catégorie d'environnement de bruit prise comme hypothèse et l'intensité du champ du signal de radiodiffusion HF (E_{sig}) à la valeur minimale requise (voir Tableau A2-7). Les échantillons audio ont été obtenus en faisant varier l'intensité du champ du signal CPL (E_{cpl}).

Les échantillons audio utilisés pour l'essai ont été prélevés à la sortie d'une borne pour écouteur.

FIGURE A2-40

Configuration de l'essai des échantillons audio



A2.5.1.2 Essai d'évaluation subjective

La Fig. A2-42 et le Tableau A2-8 présentent respectivement la configuration et les conditions de l'essai.

L'essai d'évaluation subjective a été mené conformément à la Recommandation UIT-R BS.1284. Vingt-quatre auditeurs non spécialistes ont participé aux essais d'écoute après avoir suivi une courte formation. La qualité des échantillons audio a été évaluée à l'aide de la méthode à double stimulus utilisant une échelle de dégradation (DSIS) à cinq notes:

5: Imperceptible;

4: Perceptible mais non gênant;

3: Légèrement gênant;

2: Gênant;

1: Très gênant. La qualité du signal audio combiné au bruit de fond gaussien et au bruit CPL a été comparée à la qualité du signal audio combiné au seul bruit de fond (référence).

TABLEAU A2-7

Configuration du récepteur de radiodiffusion en ondes décamétriques

Récepteur	**Antenne**	**Intensité du champ du signal de radiodiffusion HF (E_{sig})(1), (4)**	**Intensité du champ du bruit artificiel (N_{ext})(2), (4)**	**Intensité du champ du signal du modem CPL (E_{cpl})(3), (4)**
Récepteur de table(5)	Antenne tige	40 dB(µV/m)	5,3 dB(µV/m) (zone rurale)	Rapport E_{sig}/E_{cpl} entre 10 et 40 dB par incréments de 2 dB (voir Tableau A2-6)
			14,9 dB(µV/m) (quartier d'affaires)	
Récepteur de table(5)	antenne-cadre(6)	30 dB(µV/m)	5,3 dB(µV/m) (zone rurale)	
			14,9 dB(µV/m) (quartier d'affaires)	

(1) L'intensité du champ du signal de radiodiffusion HF correspond au champ minimal requis pour un tel signal: 40 dB(µV/m) pour l'international (CAMR HFBC(2), Genève 1987), 30 dB(µV/m) pour le Japon. L'intensité de champ est mesurée pour un signal de porteuse non modulé.

(2) L'intensité du champ du bruit artificiel est de 5,3 dB(µV/m) (largeur de bande = 9 kHz) pour les zones rurales et de 14,9 dB(µV/m) (largeur de bande = 9 kHz) pour les quartiers d'affaires, comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.372-8.

(3) L'intensité du champ du signal émis par le modem CPL est mesurée pour une largeur de bande de 9 kHz, qui correspond à la largeur de bande minimale requise pour une radiodiffusion en ondes décamétriques. Deux types de modems CPL ont été utilisés pendant les essais: l'un mettant en œuvre la technique de modulation à étalement de spectre et l'autre la modulation MROF.

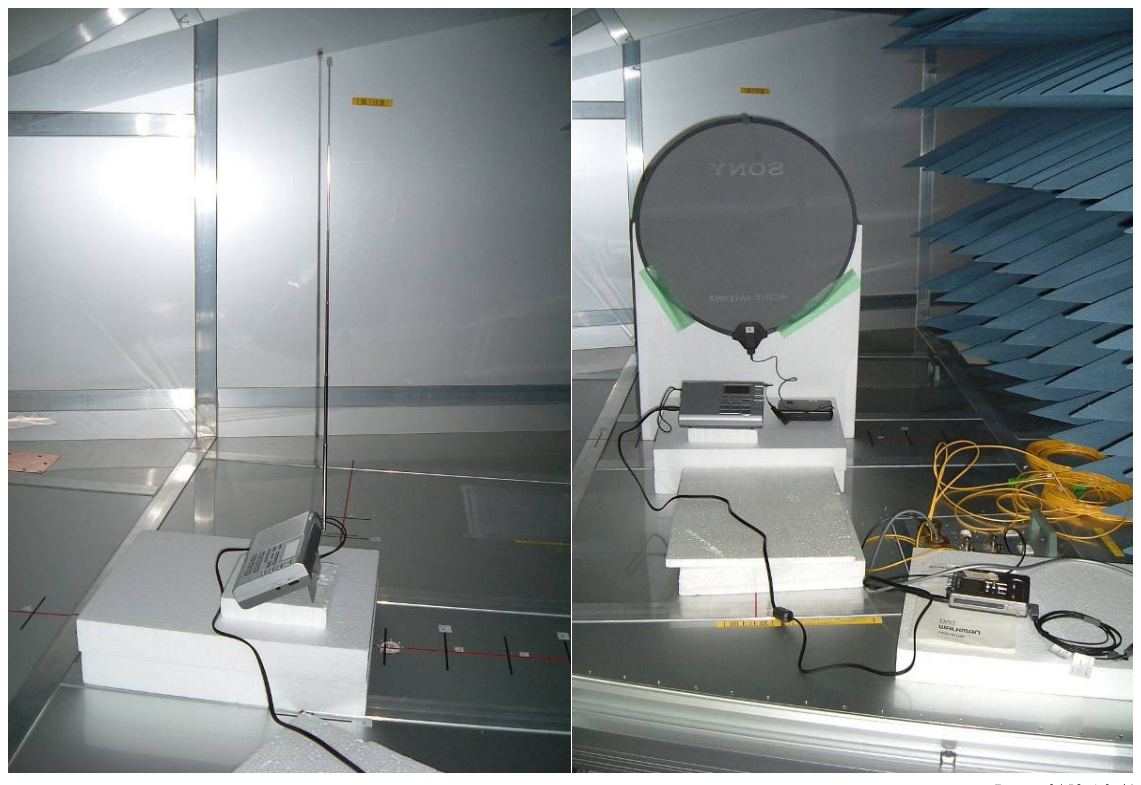
(4) Le bruit gaussien (bruit de fond) et le bruit CPL ont été superposés au signal HF dans la cellule GTEM.

(5) Un récepteur d'ondes décamétriques Sony, installé à l'intérieur de la cellule, permet de capter les signaux HF brouillés par les deux sources de bruit. Il fournit les signaux audio à évaluer. Le récepteur est caractérisé par un faible bruit intrinsèque: le rapport signal audio/bruit est supérieur à 26 dB pour une intensité de champ du signal de 40 dB(µV/m).

(6) Dans le cas correspondant à une intensité de champ de 30 dB(µV/m), une antenne Sony de type AN-LP1 a été utilisée.

FIGURE A2-41

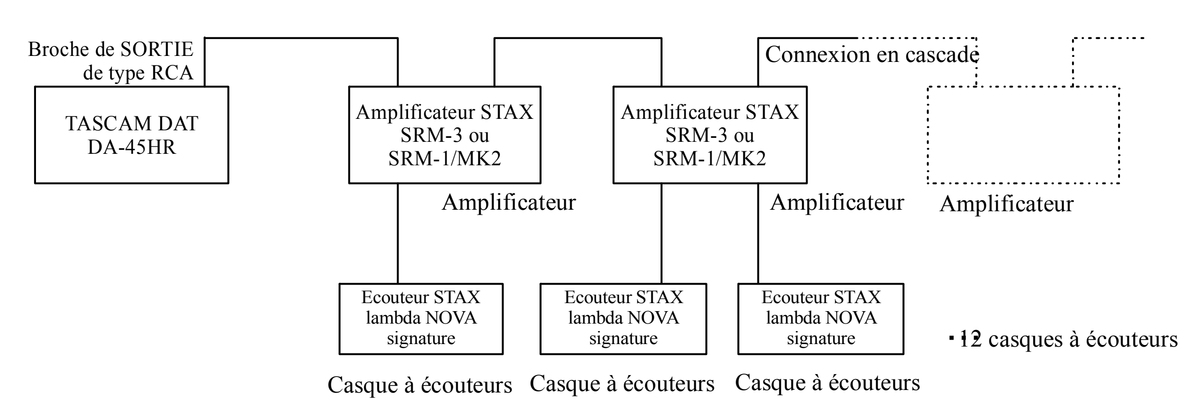
Récepteur dans la cellule GTEM



Report 2158-A2-41

FIGURE A2-42

Configuration de l'essai d'évaluation subjective



Report 2158-A2-42

TABLEAU A2-8

Conditions de mise en œuvre de l'essai d'évaluation subjective

Méthode	Méthode à double stimulus utilisant une échelle de dégradation (DSIS) séquence sonore de référence (11 s) – séquence sonore d'évaluation (11 s)
Séquence sonore de référence	Signal reçu de radiodiffusion en ondes décamétriques avec bruit artificiel seulement, dans les conditions figurant au Tableau A2-5
Séquence sonore d'évaluation	Signal reçu de radiodiffusion en ondes décamétriques avec bruit artificiel et signal émis par un modem CPL, dans les conditions figurant au Tableau A2-5
Echelle d'évaluation	Echelle de dégradation à cinq notes 5: Imperceptible 4: Perceptible mais non gênant 3: Légèrement gênant 2: Gênant 1: Très gênant
Contenus audio	P1: Parole (femme) P2: Musique (voix d'homme et accompagnement musical)
Taux moyen de modulation	30% (équivalent à UIT-R BS.703)
Bruit artificiel	Par générateur de bruit
Modem CPL	Etalement de spectre et MROF
Intensité de champ du signal émis par le modem CPL	Variation du rapport E_{sig}/E_{cpl} de 10 dB à 40 dB par incréments de 2 dB afin de couvrir la totalité de l'échelle d'évaluation de 1 à 5
Evaluateurs	24 auditeurs non-spécialistes
Méthode d'écoute	Casque à écouteurs ouvert

A2.5.2 Résultats de l'essai

Les Figs A2-43 à A2-46 présentent les résultats de l'essai d'évaluation subjective pour une intensité de champ du signal de radiodiffusion en ondes décamétriques de 30 dB(μV/m) et 40 dB(μV/m), dans des environnements de bruit simulés correspondant à une zone rurale et à un quartier d'affaires. Chaque graphique présente les résultats de l'évaluation pour deux types de modems CPL.

Comme indiqué dans le Tableau A2-8, on a utilisé pour cet essai subjectif la méthode à double stimulus utilisant une échelle de dégradation pour étudier le niveau admissible de bruit causé par le système CPL par rapport au bruit artificiel d'origine externe. La séquence sonore de référence pour la Note 4.5 a été présentée aux auditeurs participant à l'essai, lorsque le signal de radiodiffusion en ondes décamétriques subissait des brouillages provenant uniquement du bruit ambiant. Par la suite, le signal de radiodiffusion en ondes décamétriques a été mis en présence de bruit ambiant et de bruit causé par le système CPL. Le récepteur radioélectrique employé lors de l'essai présentait un rapport S/N meilleur que 26 dB pour un signal de radiodiffusion de 40 dBμV/m.

Par exemple, dans la Figure A2-43, la séquence sonore de référence était un signal de radiodiffusion de 40 dB(μV/m), avec un niveau de bruit en zone rurale d'environ 5 dB(μV/m). En conséquence, les conditions d'écoute pour la notation permettent d'obtenir de meilleures notes que la Note 4, mais de moins bonnes notes que la Note 5 avec un rapport porteuse/bruit (C/N) d'environ 35 dB.

Par ailleurs, dans la Figure A2-44, on a augmenté d'environ 15 dB(μV/m) le niveau de bruit ambiant pour le porter au niveau du bruit dans un quartier d'affaires. En conséquence, les conditions d'écoute de référence n'étaient pas bonnes, mais légèrement gênantes avec un rapport C/N de 25 dB. Toutefois, nous avons supposé que, même dans des conditions d'écoute aussi médiocres, les

personnes habituées à un environnement sonore bruyant attribueraient au signal de radiodiffusion la Note 4.5 comme indiqué sur cette figure.

Il ressort des résultats de ces essais que le bruit causé par des CPL peut dégrader la qualité du son perçu provenant de signaux de radiodiffusion en ondes décamétriques, la dégradation étant fonction de l'environnement de bruit (intensité du champ du bruit artificiel), de l'intensité du champ du signal de radiodiffusion, de la puissance de réception totale et du type de modem CPL.

FIGURE A2-43

Dégradation de la qualité du son en présence de bruit causé par des CPL

(Signal 40 dB(μV/m) + bruit correspondant à la catégorie d'environnement «zone rurale»)

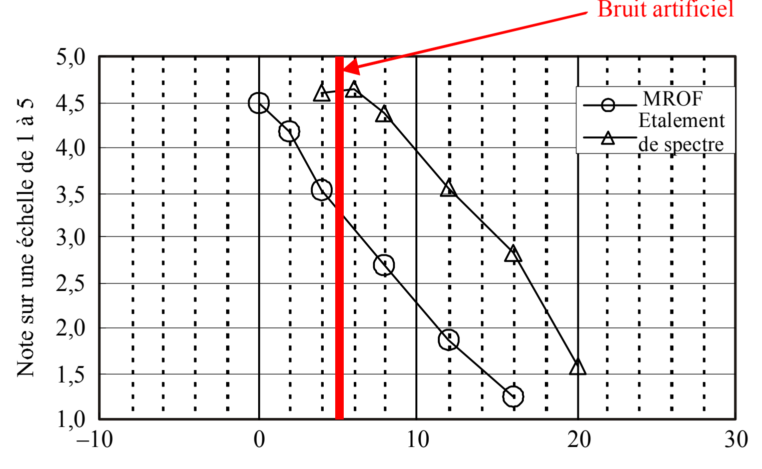


FIGURE A2-44

Dégradation de la qualité du son en présence de bruit causé par des CPL

(Signal 40 dB(μV/m) + bruit correspondant à la catégorie d'environnement «quartier d'affaires»)

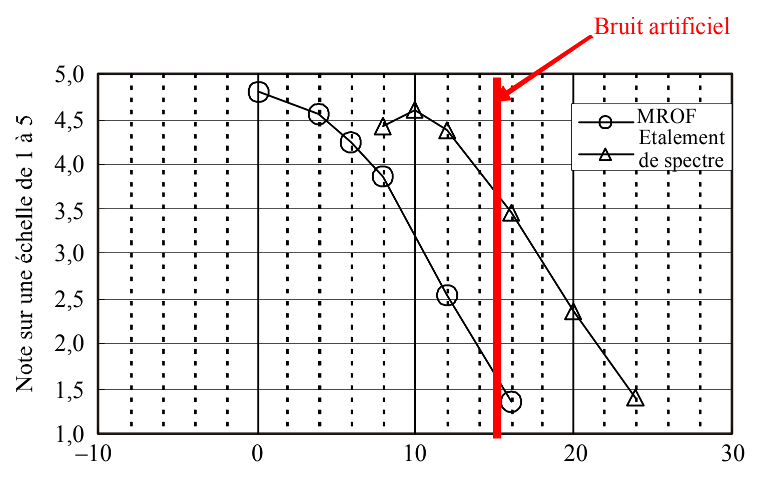


FIGURE A2-45

Dégradation de la qualité du son en présence de bruit causé par des CPL

(Signal 30 dB(μV/m) + bruit correspondant à la catégorie d'environnement «zone rurale»)

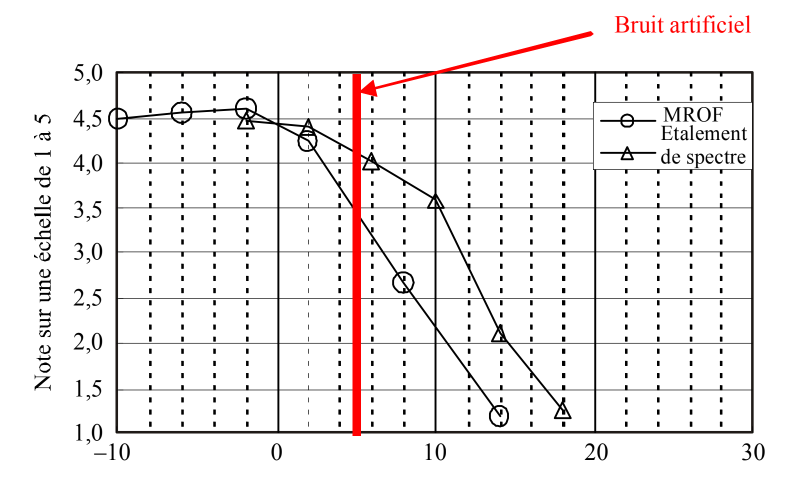
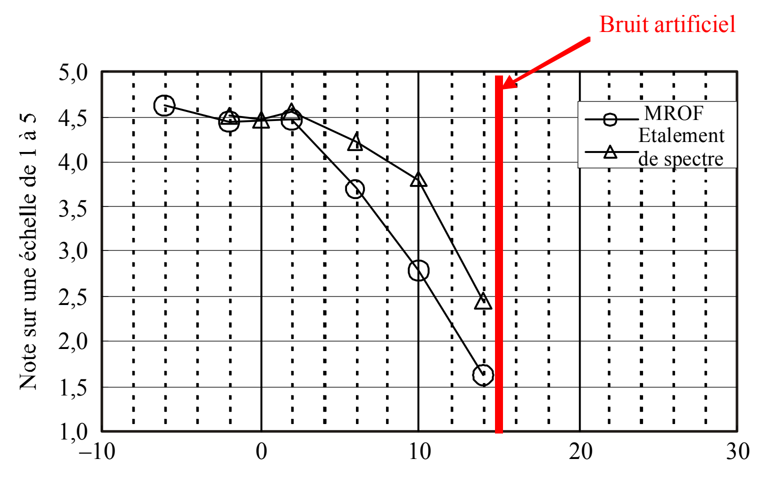


FIGURE A2-46

Dégradation de la qualité du son en présence de bruit causé par des CPL

(Signal 30 dB(μV/m) + bruit correspondant à la catégorie d'environnement «quartier d'affaires»)



A2.5.3 Matériel utilisé pour l'essai

TABLEAU A2-9

Liste des dispositifs d'essai

Equipement	Spécifications ou référence	Quantité
Cellule TEM EGT-1100 (ELENA ELECTRONICS CO., LTD)	Gamme de fréquences: 3,9-26,1 MHz Bruit de fond: 0 dB(µV/m) ou moins Taille max. de l'équipement en essai: 600 mm^3 ou plus	1
Modem CPL	(MROF)	1
Modem CPL	(Etalement de spectre)	1
V-LISN	V-LISN	1
Affaiblisseur réglable	Par incréments de 2 – 3 dB	2
Générateur de bruit	Agilent E4438C	1
Source du signal de modulation	Lecteur de disque compact	1
Générateur de signaux de référence	Panasonic VP-8121B	1
Multiplexeur du signal émis		1
Analyseur de spectre		1
Radio en ondes décamétriques	SONY ICF-SW35	1
Antenne pour radio en ondes décamétriques	SONY AN-LP1	1
DAT	SONY TCD-D100	1
Convertisseur optique-électrique	MOTU 308	1
Convertisseur USB	M.Audio Audiophile USB	1
Enregistreur	DAT (TASCAM DA45HR) PC (IBM THINKPAD R51)	1 1
Enceinte acoustique destinée au responsable de l'essai	FOSTEX 6301B	1
Matériel utilisé pour l'écoute subjective	Lecteur, casque à écouteurs (TASCAM DAHR) STAX Lambda Nova Signature STAX SRM-3, SRM-1/MK2	24
Evaluateur	Non spécialiste	24
Câbles, etc.		Autant que nécessaire

A2.6 Analyse de compatibilité portant sur les critères de protection des systèmes radio mobiles aéronautiques en ondes décamétriques au regard des systèmes CPL de type *Indoor*

A2.6.1 Introduction

Pour la communication à large bande sur le réseau électrique alternatif basse tension et les installations de type *Indoor*, les systèmes CPL modernes utilisent la gamme de fréquences 1 705 kHz-30 MHz.

Etant donné que ces réseaux et installations électriques n'ont pas été conçus pour transporter des signaux utiles à des fréquences très supérieures à la fréquence d'alimentation (c'est-à-dire 50 ou 60 Hz), l'utilisation des CPL sur le terrain se traduira, si elle se généralise, par une augmentation considérable du niveau des rayonnements RF parasites provenant de ces équipements. Il ne fait aucun doute qu'une telle augmentation du bruit radioélectrique peut accroître très largement la probabilité de brouillage de la réception radioélectrique en général, là où s'accumulent les dispositifs CPL en exploitation.

La présente analyse de compatibilité porte sur la protection des récepteurs aéroportés dans le service mobile aéronautique.

Les calculs effectués dans cette étude visent à montrer dans quelle mesure les applications CPL sont susceptibles de perturber les récepteurs mobiles aéronautiques et à examiner s'il est possible d'éviter ou au minimum d'atténuer ces brouillages.

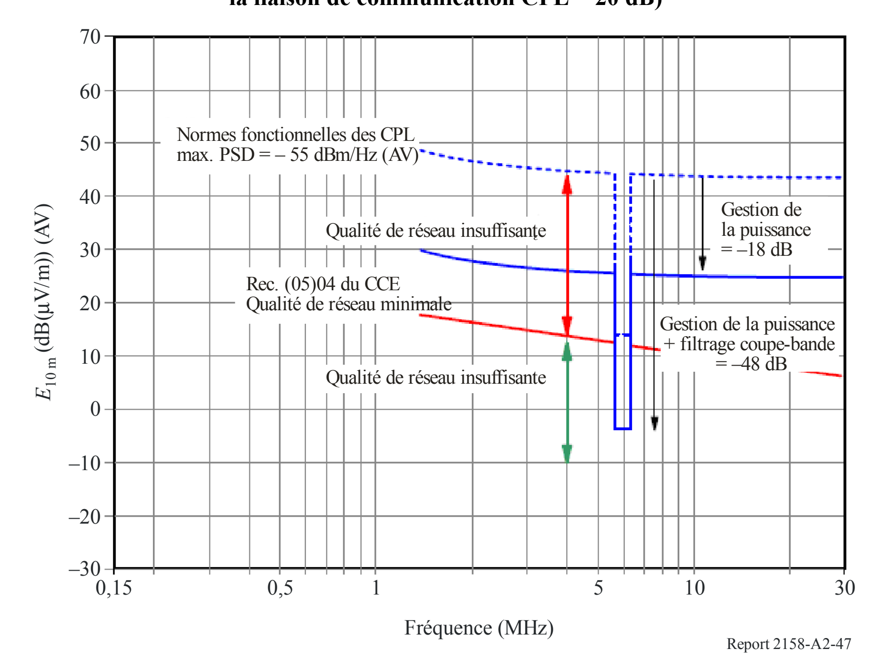
A2.6.2 Hypothèses de travail

Conformément aux normes fonctionnelles, les dispositifs CPL pour la communication de type *Indoor* délivrent une densité spectrale de puissance (DSP) maximale de –55 dBm/Hz ou –73 dBm/Hz. Les fréquences transmises par les câbles électriques sont actuellement comprises entre 1 705 kHz et 30 MHz. Tous les systèmes disponibles sur le marché reposent sur la transmission multiporteuse et utilisent les systèmes de modulation MROF (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) et AMDP/AC (accès multiple avec détection de porteuse/anti-collision).

Au vu des propriétés HF – statistiquement avérées – qui caractérisent les réseaux électriques types de courant alternatif installés dans les habitations en Europe, il est possible d'estimer le niveau des rayonnements RF parasites qui émanent de bâtiments dans lesquels s'effectuent des communications CPL. Pour analyser les incidences de ces perturbations sur des récepteurs aéroportés, une source ponctuelle d'émission a été développée par la méthode des éléments finis. Les caractéristiques de rayonnement de la source résultant de cette modélisation sont présentées à la Fig. A2-47 (courbes bleues).

FIGURE A2-47

Dispositifs CPL hors type *Access*, composante électrique réelle des rayonnements RF parasites provenant des installations du réseau électrique alternatif dans un bâtiment équipé de systèmes CPL (à 10 m du mur extérieur ou du toit du bâtiment), effet de la gestion de la puissance et du filtrage coupe-bande (à environ 6 MHz) (cas de l'Europe ou s'applique la Rec. (05)04 du CCE, affaiblissement de bout en bout de la liaison de communication CPL = 20 dB)



Ces caractéristiques de rayonnement correspondent au scénario normal de fonctionnement des dispositifs CPL. Il est possible de simuler deux dispositifs CPL en cours de communication ou plus et plusieurs appartements distincts dans le bâtiment. A des fins de comparaison, la Fig. A2-47 contient également les valeurs limites figurant dans la Recommandation (05)04 du CCE. Ces limites peuvent être considérées comme des mesures de référence d'une part de la qualité acceptable d'une installation électrique en courant alternatif et d'autre part des rayonnements émis par des bâtiments sous l'effet de communications CPL à large bande en général.

La courbe bleue en pointillés représente l'intensité de champ RF parasite à une distance oblique de 10 m du câble transportant les communications CPL ou, dans le cas de la présente étude, du bâtiment dans la direction z. En l'absence de toute mesure d'atténuation, on observe une intensité de champ RF parasite importante, et ce à toutes les fréquences des signaux CPL transmis par les câbles. La courbe correspond au champ parasite résultant du fonctionnement de dispositifs CPL dont la DSP est égale à –55 dBm/Hz. Les appareils CPL de ce type peuvent, d'après leurs prescriptions fonctionnelles, être équipés de dispositifs d'atténuation: gestion de la puissance et filtrage coupe-bande par exemple. Lors des essais de CEM, il convient de contrôler, au niveau produit, la qualité de fonctionnement de ces dispositifs d'atténuation.

En pratique, ces dispositifs d'atténuation ont des effets bénéfiques: dans des conditions de fonctionnement normal, la gestion de la puissance permet de réduire le niveau de la DSP de 18 dB, ce qui se traduit par une réduction de l'intensité de champ RF parasite de 18 dB également, ainsi que le montre la Fig. A2-47 (courbes bleues).

Il est possible de réduire le niveau de la DSP de 30 dB supplémentaires grâce à plusieurs techniques de filtrage coupe-bande, mais cette méthode est généralement réservée à certaines fréquences ou bandes de fréquences sensibles utilisées pour les radiocommunications de Terre. La figure illustre l'effet d'un filtrage coupe-bande accompagné d'une réduction de la puissance dans la bande des

6 MHz. Pour des fréquences sensibles, l'intensité de champ RF parasite résultant peut donc être réduite de quelque 48 dB.

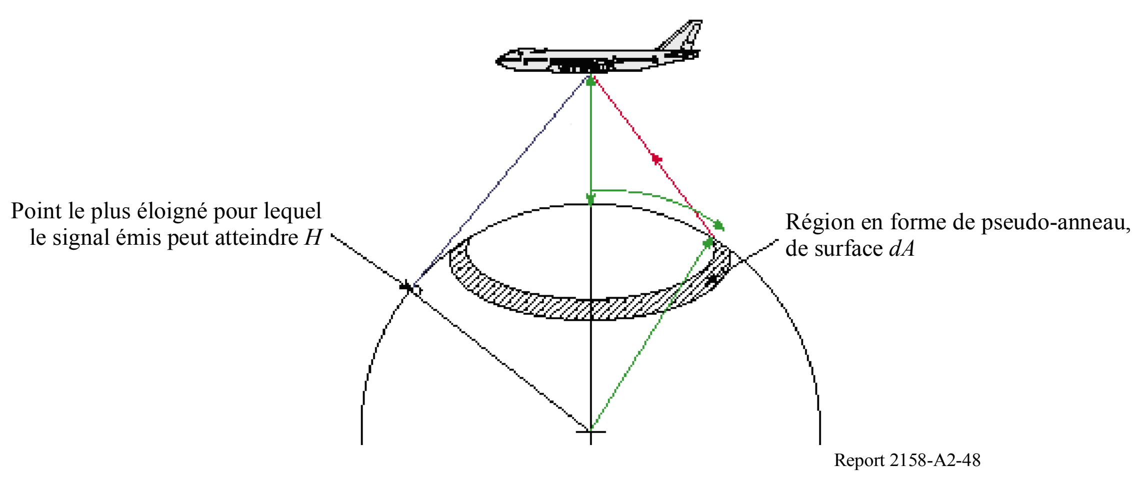
A2.6.3 Modèle de compatibilité/calcul géométrique

Le modèle de compatibilité suivant est utilisé pour évaluer les brouillages que pourraient causer les effets cumulatifs des sources CPL aux récepteurs aéroportés.

Le récepteur de l'aéronef perçoit une augmentation du bruit de fond apparent. La configuration géométrique du problème est tirée de la Fig. A2-48.

FIGURE A2-48

Modèle du Groupe de travail SE 35 du CCE



Pour un signal brouilleur qui frappe directement le récepteur (propagation en espace libre):

$$f[x] = \frac{1}{4\pi l^2}$$

$$l = \sqrt{R_E^2 - 2\cos\left[\frac{x}{R_E}\right] R_E (h + R_E) + (h + R_E)^2}$$

où les valeurs x et l ne peuvent physiquement dépasser:

$$x_{max} = R_E \arccos[R_E / (R_E + h)] \text{ et } l_{max} = \sqrt{h(h + 2R_E)} \text{ respectivement}$$

$$f[x] = \frac{1}{4\pi\left(R_E^2 - 2\cos\left[\frac{x}{R_E}\right] R_E (h + R_E) + (h + R_E)^2 \right)}$$

$$PFD = \frac{p_{TX}\ g_{TX} D\ R_E}{2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sin\left[\frac{x}{R_E}\right]}{\left(R_E^2 - 2\cos\left[\frac{x}{R_E}\right] R_E (h + R_E) + (h + R_E)^2 \right)} \mathrm{d}x$$

soit, pour la forme normalisée:

$$PFD_{\text{par unité de densité de PIRE}} = \frac{R_E}{2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sin\left[\frac{x}{R_E}\right]}{\left(R_E^2 - 2\cos\left[\frac{x}{R_E}\right] R_E (h + R_E) + (h + R_E)^2\right)} \, \mathrm{d}x$$

Ce modèle rend compte des effets cumulatifs d'une surface donnée de sources de brouillage, compte tenu de la densité de ces sources (sources de brouillage/km^2). L'intensité de champ des brouillages correspondante est déterminée à partir de la densité de puissance surfacique, qui peut ensuite être comparée à divers seuils d'évaluation. Les calculs ont été effectués à l'aide du programme arithmétique Mathcad.

A2.6.4 Seuil d'évaluation pour le service radioaéronautique

Les valeurs suivantes sont utilisées comme seuils d'évaluation des brouillages:

– intensité de champ brouilleur maximal admissible pour le récepteur aéroporté, mesurée en laboratoire; et

– bruit de fond mesuré pendant les vols de mesure;

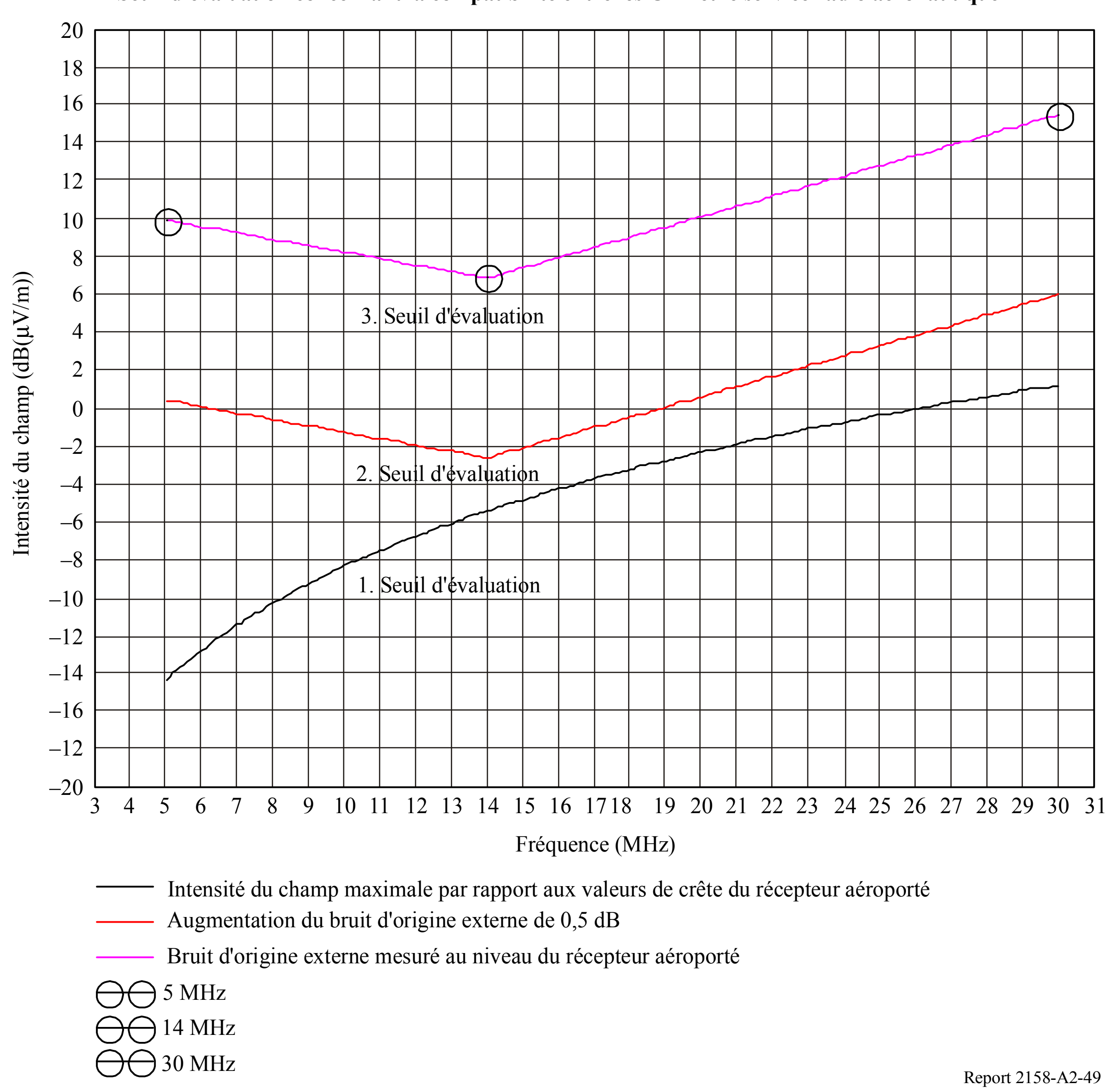
(voir la Fig. A2-49).

Les vols de mesure ont été effectués dans le cadre d'un groupe de travail de la BNetzA, en coopération avec la NARFA (National Allied Radio Frequency Agency), le chantier naval militaire Landsberg et l'association ANGA, qui regroupe plusieurs opérateurs de réseaux câblés allemands. Le bruit de fond a été mesuré lors de trois vols de mesure à plusieurs altitudes, respectivement à 5 MHz, 14 MHz et 30 MHz. Ces valeurs de mesure constituent, en plus de l'intensité de champ brouilleur maximal admissible (courbe noire de la Fig. A2-49), un deuxième seuil d'évaluation (courbe magenta de la Fig. A2-49). La Fig. A2-49 présente un troisième seuil (courbe rouge), qui correspond à la courbe magenta diminuée de 9,5 dB environ, calculée de sorte qu'un signal brouilleur analogue à du bruit produise un bruit total augmentant le bruit de fond mesuré d'une valeur ne dépassant pas 0,5 dB.

De fait, une augmentation du bruit de fond de 0,5 dB est jugée tout juste admissible dans le cas d'un service radioélectrique important pour la sécurité tel que le service radio mobile aéronautique.

FIGURE A2-49

Seuil d'évaluation concernant la compatibilité entre les CPL et le service radio aéronautique



A2.6.5 Résultats de l'étude

Les champs produits par l'exploitation des CPL ont été comparés aux trois seuils d'évaluation. Le tableau suivant montre de combien de décibels le signal brouilleur CPL doit être diminué pour qu'il soit conforme aux critères d'évaluation pertinents. Les scénarios mettant en œuvre soit une gestion de la puissance, soit un filtrage coupe-bande, soit les deux sont également présentés.

Les calculs reposent sur une densité de sources de brouillage de 250 éléments/km^2, une altitude d'aéronef de 1 km et une zone de brouillage d'un rayon égal à 10 km. Pour de plus amples informations sur les caractéristiques de rayonnement de ces sources de brouillage, voir la Fig. A2-47. Les Tableaux A2-10, A2-11 et A2-12 précisent, pour différents critères (sensibilité du récepteur, augmentation du bruit de 0,5 dB, augmentation du bruit de 3 dB), de combien de décibels le champ rayonné par la surface brouilleuse constituée de toutes les sources ponctuelles CPL doit

être diminué (dans les cas exposés ci-dessus) pour assurer une compatibilité au niveau du récepteur aéroporté. La compatibilité est également indiquée dans le cas de la mise en œuvre d'une gestion de la puissance et du filtrage coupe-bande. Le Tableau A2-13 présente les valeurs de correction pour différentes densités de sources de brouillage.

TABLEAU A2-10

250 sources de brouillage/km² rayon de la surface constituée par les sources de brouillage = 10 km altitude du vol = 1 km

Sensibilité du récepteur	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz
CPL (–55 dBm/Hz)	–65 dB	–59 dB	–55 dB	–52 dB	–50 dB	–49 dB
CPL (avec gestion de la puissance)	–47 dB	–41 dB	–37 dB	–34 dB	–32 dB	–31 dB
CPL (avec filtrage coupe-bande)	–35 dB	–29 dB	–25 dB	–22 dB	–20 dB	–19 dB
CPL (avec gestion de la puissance + filtrage coupe-bande)	–17 dB	–11 dB	–7 dB	–4 dB	–2 dB	–1 dB

Dans l'hypothèse d'une augmentation maximale du bruit de 0,5 dB par rapport au bruit causé par les signaux brouilleurs CPL, une gestion de la puissance et un filtrage coupe-bande des fréquences concernées sur tous les dispositifs CPL n'assurent une compatibilité qu'aux fréquences supérieures à 20 MHz (voir les valeurs surlignées en vert à la dernière ligne du Tableau A2-11). Au-dessous de 20 MHz, les valeurs calculées sont supérieures, avec un maximum de 3,5 dB.

TABLEAU A2-11

250 sources de brouillage/km² rayon de la surface constituée par les sources de brouillage = 10 km altitude du vol = 1 km

Augmentation du bruit de 0,5 dB	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz
CPL (–55 dBm/Hz)	–50,5 dB	–51,5 dB	–51,5 dB	–49 dB	–46,5 dB	–45,5 dB
CPL (gestion de la puissance)	–32,5 dB	–33,5 dB	–33,5 dB	–31 dB	–28,5 dB	–27,5 dB
CPL (filtrage coupe-bande)	–20,5 dB	–21,5 dB	–21,5 dB	–19 dB	–16,5 dB	–15,5 dB
CPL (gestion de la puissance + filtrage coupe-bande)	–2,5 dB	–3,5 dB	–3,5 dB	–1 dB	**1,5 dB**	**2,5 dB**

Dans le cas du troisième seuil d'évaluation (augmentation du bruit de 3 dB maximum), seule une gestion de la puissance combinée à un filtrage coupe-bande sur la gamme de fréquences considérée suffirait (valeurs surlignées en vert dans le Tableau A2-12). Cela étant, ce seuil d'évaluation se révélerait irréaliste, car il correspond à un doublement de la puissance du bruit qui empêcherait les services radioélectriques de satisfaire à leurs exigences de sécurité.

TABLEAU A2-12

250 sources de brouillage/km² rayon de la surface constituée par les sources de brouillage = 10 km altitude du vol = 1 km

Augmentation du bruit de 3 dB	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz
CPL (–55 dBm/Hz)	–41 dB	–42 dB	–42 dB	–39.5 dB	–37 dB	–36 dB
CPL (gestion de la puissance)	–23 dB	–24 dB	–24 dB	–21.5 dB	–19 dB	–18 dB
CPL (filtrage coupe-bande)	–11 dB	–12 dB	–12 dB	–9.5 dB	–7 dB	–6.5 dB
CPL (gestion de la puissance + filtrage coupe-bande)	**7 dB**	**6 dB**	**6 dB**	**8.5 dB**	**11 dB**	**12 dB**

Pour des densités de sources de brouillage différentes de 250 sources/km^2, on peut appliquer les valeurs de correction suivantes:

TABLEAU A2-13

Correction relative à la densité des sources de brouillage

Densité des sources de brouillage (sources/km²)	Valeur de correction (dB)
50	7 dB
100	4 dB
150	2 dB
200	1 dB
250	0 dB
300	–1 dB

A2.6.6 Autres facteurs

On suppose, dans l'étude ci-dessus, que la densité des sources de brouillage est le paramètre de compatibilité prépondérant. Une analyse a montré que d'autres paramètres (altitude de vol, rayon de la surface des sources de brouillage considérée, zones dites sensibles, etc.) avaient une influence négligeable sur les calculs.

A2.6.7 Conditions devant être remplies par les dispositifs CPL en vue de la protection du service mobile aéronautique dans la bande des fréquences décamétriques

On ne saurait remettre en question la nécessité de protéger comme il se doit les récepteurs aéroportés du service aéronautique contre les brouillages. La question est de savoir dans quelle mesure et par quels moyens cette protection peut être assurée sans compromettre la technologie CPL en pleine évolution.

Le CISPR examine actuellement si, pour des radiofréquences sensibles, il est envisageable de prendre des mesures d'atténuation (filtrage coupe-bande par exemple) afin de réduire la DSP du signal CPL utile, soit de façon permanente, soit de façon dynamique en fonction des conditions locales de réception radio et du type de service radioélectrique concerné.

Annexe 3

Emissions radiofréquences provenant des systèmes CPL

A3 Emissions radiofréquences provenant des systèmes CPL

A3.1 Mesure des niveaux de rayonnement RF non intentionnels émis par les systèmes CPL de type *Access* dans les bandes de fréquences décamétriques

A3.1.1 Introduction

Les systèmes de courants porteurs en ligne (CPL) sont largement utilisés dans la fourniture de nouveaux services aux consommateurs, notamment la transmission de données et les services

Internet, mais aussi comme solution de connexion pour le dernier kilomètre. Or l'énergie rayonnée non intentionnellement par ces systèmes peut produire des brouillages préjudiciables aux dispositifs situés à leur voisinage et fonctionnant entre 1 700 kHz et 80 MHz, ce qui inclut les bandes de fréquences décamétriques (HF).

A3.1.2 Objectif

Effectuer une analyse pratique et approfondie des niveaux de rayonnement CPL et des brouillages éventuels causés aux systèmes exploitant la bande des fréquences décamétriques.

A3.1.3 Concept de brouillage

Le concept élémentaire de brouillage repose sur le fait que certains dispositifs rayonnent suffisamment d'énergie pour perturber voire interrompre le fonctionnement d'autres systèmes réglementés. Dès lors, en première approche, il importe de se faire une idée des niveaux RF maximum de brouillage que les systèmes de communication exploitant la bande des fréquences décamétriques peuvent supporter sans être perturbés.

A3.1.4 Description de l'essai

En guise d'étude préliminaire sur les niveaux de rayonnement dans les bandes de fréquences décamétriques, plusieurs essais ont été effectués au Brésil. La configuration des essais menés à Campinas, Sao Paulo, est présentée à la Fig. A3-1. L'installation consiste en un équipement CPL de deuxième génération fonctionnant sur une ligne électrique basse tension (380 m) et en une antenne HF située à 41 m de l'équipement CPL. La station de Campinas était connectée à la station de Brasilia via une liaison HF permettant d'émettre et de recevoir de la voix et des données. Compte tenu de la dimension de l'antenne HF (doublet large bande), il n'était pas possible de changer de position facilement. L'antenne est donc toujours restée au même endroit.

FIGURE A3-1

Diagramme représentant le système CPL, l'antenne et la station HF

Antenne doublet pointée sur Brasilla
Direction de Brasilia
Station HF voix et données
41 m
Station CPL esclave
Ligne de tension
Station CPL maître
Environ 380 m
Report 2158-A3-01

Pour commencer, quelques mesures du bruit d'origine externe ont été effectuées en vue d'obtenir des données d'occupation du spectre en l'absence de CPL. Les mesures ont été prises entre 3 et 30 MHz par tranches de 2 MHz de largeur de bande (voir l'exemple à la Fig. A3-2).

FIGURE A3-2

Bruit d'origine externe: occupation du spectre

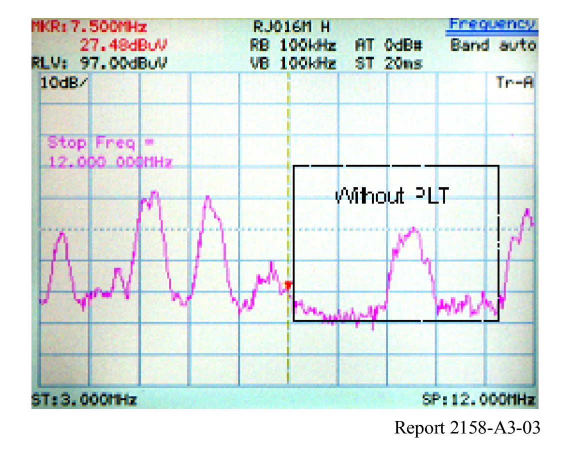


Report 2158-A3-02

La Fig. A3-3 montre le spectre entre 3 et 12 MHz sans CPL et la Fig. A3-4 en présence d'énergie CPL dans le même intervalle de fréquences.

FIGURE A3-3

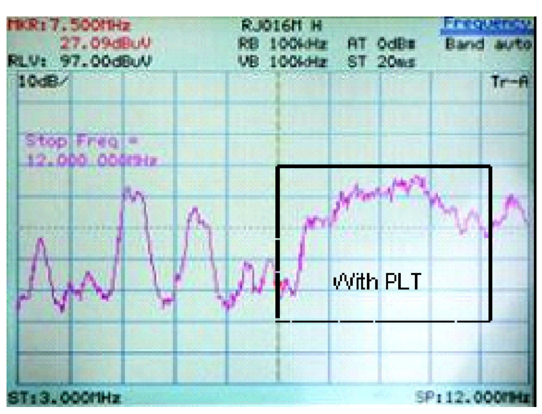
De 3 à 12 MHz sans CPL



Report 2158-A3-03

FIGURE A3-4

Spectre en présence de CPL



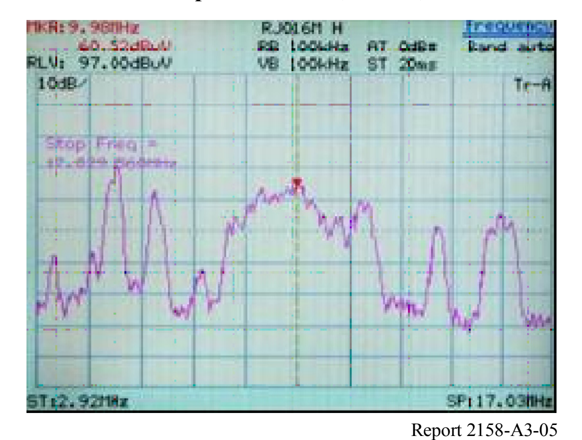
Report 2158-A3-04

Légende de la Fig A3-3 et Fig. A3-4:
Without PLT: Sans CPL
With PLT: Avec CPL

La Fig. A3-5 montre le spectre pour des systèmes CPL en exploitation entre 7,98 et 12,5 MHz et la Fig. A3-6 pour d'autres équipements CPL fonctionnant dans une large bande comprise entre 3 et 30 MHz environ.

FIGURE A3-5

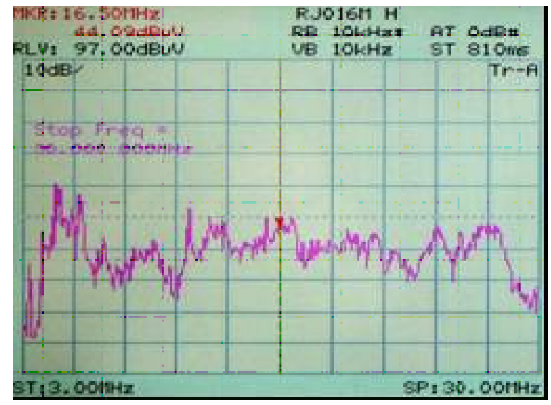
CPL en exploitation de 7,98 à 12,5 MHz



Report 2158-A3-05

FIGURE A3-6

CPL en exploitation dans une large bande



Report 2158-A3-06

Les niveaux de rayonnement CPL ont été mesurés par l'antenne HF et correspondent donc à ceux effectivement reçus par le système HF. Dans certaines parties du spectre, les niveaux relevés dépassaient 60 dB(µV).

Les niveaux de réception des signaux HF à Campinas étaient compris entre 13 et 49 dB(µV) environ (mesures effectuées avec un signal d'essai de 1 kHz). Lorsque le système CPL était en service, la transmission des données HF était bloquée et le récepteur audio émettait un bruit important, perturbant totalement la réception de la voix.

Le niveau de rayonnement CPL à la distance considérée était donc d'une intensité suffisante pour causer des brouillages préjudiciables. Il a été diminué par paliers afin de déterminer le seuil de brouillage, mais, à cette distance, tous les niveaux de rayonnement CPL ont empêché la transmission des données. Il n'a donc pas été possible de déterminer un tel seuil.

A3.1.5 Remarques

Les essais l'ont clairement démontré, l'énergie rayonnée par les systèmes CPL est susceptible de causer des brouillages aux télécommunications dans la bande des fréquences décamétriques et dans d'autres bandes de fréquences. Pour permettre l'utilisation partagée des ondes décamétriques, il est donc nécessaire d'appliquer des techniques d'atténuation.

En théorie, au vu des paramètres de sensibilité des équipements en ondes décamétriques, il devrait être possible d'évaluer un niveau de rayonnement CPL maximal acceptable qui permette d'éviter les brouillages. Par exemple, pour un SINAD de 10 dB à 0,5 µV, ce qui équivaut à −6 dB(µV) (niveau d'entrée minimum en ondes décamétriques), le niveau produit par les CPL devait être inférieur à −16 dB(µV), ce qui, dans certains endroits, peut être inférieur au niveau du bruit de fond.

Pour élaborer un modèle de rayonnement des lignes électriques par analogie au comportement des antennes, on est confronté à des questions complexes, qui concernent notamment la prise en compte des irrégularités géométriques, des différents environnements avoisinants, des zones rurales et des zones résidentielles. Autant d'éléments qui peuvent considérablement modifier les caractéristiques de propagation des ondes et influer sur la validité des résultats. En outre, les zones avoisinantes sont soumises aux champs proches (région de champ proche réactif ou région de Fresnel), ce qui complique la prévision des niveaux RF rayonnés à partir d'un modèle général.

Compte tenu de ce qui précède, il est nécessaire de mener des essais empiriques pour se faire une idée pratique des distances minimales de coordination requises entre les systèmes CPL et les

systèmes fonctionnant dans la bande des ondes décamétriques. Des essais supplémentaires ont donc été effectués à Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brésil, où un système CPL est actuellement en exploitation.

A cet effet, une liaison en ondes décamétriques a été établie entre les stations de Porto Alegre et de Rio de Janeiro. Les essais ont été effectués en avril 2008 avec une station HF mobile équipée d'une antenne-fouet. Les procédures étaient fondamentalement les mêmes que celles utilisées à Campinas, à la différence que la station HF pouvait se déplacer loin de la source CPL et recueillir davantage de données en continu.

Il a été observé des brouillages préjudiciables des systèmes HF par les CPL, brouillages qui diminuaient pour des distances supérieures à 450 m par rapport aux lignes électriques. Il importe toutefois de noter que la liaison HF considérée était de courte distance (un bond dans l' ionosphère). Or ce type de liaison présente généralement un niveau de signal supérieur aux liaisons à grande distance, lesquelles nécessiteraient donc probablement, pour éviter les brouillages, une distance minimale supérieure entre les CPL et la station de réception.

A3.1.6 Technique d'atténuation envisageable

En prenant comme critère une moyenne des niveaux de réception en ondes décamétriques sur les liaisons à grande distance (plus de 1 500 km) et sur les liaisons à courte distance (jusqu'à 1 500 km), il est possible de proposer des distances à respecter dans la pratique entre les systèmes CPL et les stations HF pour atténuer ou réduire au minimum les brouillages.

a) liaison HF à grande distance: 1 000 m;

b) liaison HF à courte distance: 500 m.

Pour s'assurer, avec un niveau de confiance minimal, que les systèmes de réception HF ne sont pas brouillés par des dispositifs CPL, il est nécessaire de respecter ces distances de protection.

A3.1.7 Conclusions

Les techniques de modélisation visant à évaluer les niveaux RF rayonnés par des lignes électriques transportant des signaux CPL ne présentent un intérêt qu'à proximité des lignes droites.

Les niveaux CPL évalués à l'aide d'antennes-cadres donnent une estimation grossière du risque de brouillage. Il n'est pas possible de donner des seuils précis en raison de la forte variation des niveaux de signaux HF pendant la journée et pendant la nuit.

Il est probable qu'à proximité de systèmes CPL, les services de radiodiffusion par modulation d'amplitude seront brouillés s'ils utilisent la même bande de fréquences que les CPL.

Il semble que la meilleure méthode de déterminer les distances de brouillage soit d'effectuer des mesures sur des systèmes HF situés à proximité de systèmes CPL, méthode qui donne une bonne idée de la propagation des signaux dans la pratique.

On peut envisager, comme technique pratique d'atténuation, de prendre en compte le cas de brouillage le plus défavorable correspondant à une station en ondes décamétriques installée à proximité d'un système CPL en fonctionnement et d'utiliser les distances indiquées au paragraphe 6 comme critère de protection pour des liaisons HF à courte distance ou à grande distance.

A3.2 Mesures des rayonnements émis par des dispositifs CPL de type *Indoor* dans un environnement de type résidentiel situé au Canada

A3.2.1 Introduction

A la suite des mesures effectuées par Kitagawa et Ohishi[57], la NABA (North American Broadcasters Association/association des radiodiffuseurs d'Amérique du Nord) a demandé au Centre de recherche sur les communications, Canada (CRC) de procéder à des mesures de rayonnement émis par des dispositifs CPL fonctionnant dans un environnement de type résidentiel. La présente section décrit les procédures et les résultats des mesures de champ émis par des systèmes CPL, qui ont été effectuées dans le but de déterminer les risques de brouillages causés par ces systèmes. Le rapport du CRC[58] figure dans l'addendum 1. Les mesures montrent clairement qu'il est nécessaire de protéger le service de radiodiffusion contre ces brouillages. Etant donné que les dispositifs CPL fonctionnent sans attribution de fréquences correspondante dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT, c'est la Recommandation UIT-R BT.1786 qui fournit les critères de protection appropriés du service de radiodiffusion.

A3.2.2 Mesure de la puissance transmise par conduction – procédure et résultats de l'essai

Huit dispositifs CPL disponibles sur le marché, faciles à se procurer aux Etats-Unis, au Canada et au Japon et représentant les différentes normes CPL ont été utilisés au cours de l'essai. Ces dispositifs CPL, décrits au Tableau A3-1, ont été évalués dans le laboratoire du CRC avant les essais sur le terrain.

Comme le montre le Tableau A3-1, une grande partie des équipements CPL utilise la même norme ou différentes versions de la même norme. A la suite de l'évaluation en laboratoire, il a été décidé de limiter le nombre d'appareils CPL pour l'essai sur le terrain à un appareil par norme. Les dispositifs 2, 3 et 6 ont ainsi été retenus.

La configuration du laboratoire pour la mesure de la puissance transmise par conduction est présentée à la Fig. A3-7. La source de courant alternatif est obtenue en faisant passer la source d'énergie principale du CRC par un transformateur élévateur et par un disjoncteur afin d'isoler et de convertir le courant alternatif en une tension monophasée de 60 Hz comprise entre 110 et 120 V. Deux prises électriques, sur lesquelles sont branchés les deux dispositifs CPL, sont reliées par un câble électrique 14/2 mis à la terre de 1,75 m, type de câble que l'on trouve d'ordinaire dans les constructions résidentielles. Un ordinateur est connecté à chaque dispositif CPL pour le transfert de données. L'un d'eux envoie à l'autre un gros fichier.

Pour mesurer la puissance des signaux de fréquences inférieures à 30 MHz, on a utilisé un analyseur de spectre Agilent E4405B, réglé sur une bande de résolution de 9 kHz, avec détection de crête et un temps de maintien de crête égal à 10 secondes. Pour mesurer avec l'analyseur de spectre le signal transmis par les dispositifs CPL par conduction, il a fallu supprimer la composante 60 Hz/110-120 V. Pour ce faire, on a utilisé un filtre AC de type LC du deuxième ordre avec une fréquence de coupure de 1 MHz.

---

[57] KITAGAWA M. et OHISHI M., «Measurements of the Radiated Electric Field and the common Mode Current from the In-house Broadband Power Line Communications in Residential Environment I», *IEICE Tech. Rep.*, Vol. 107, **533,** EMCJ2007-117, p. 1-6, mars 2008.

[58] http://www.nabanet.com/nabaweb/members/pdf/itur/CRCReport.pdf.

TABLEAU A3-1

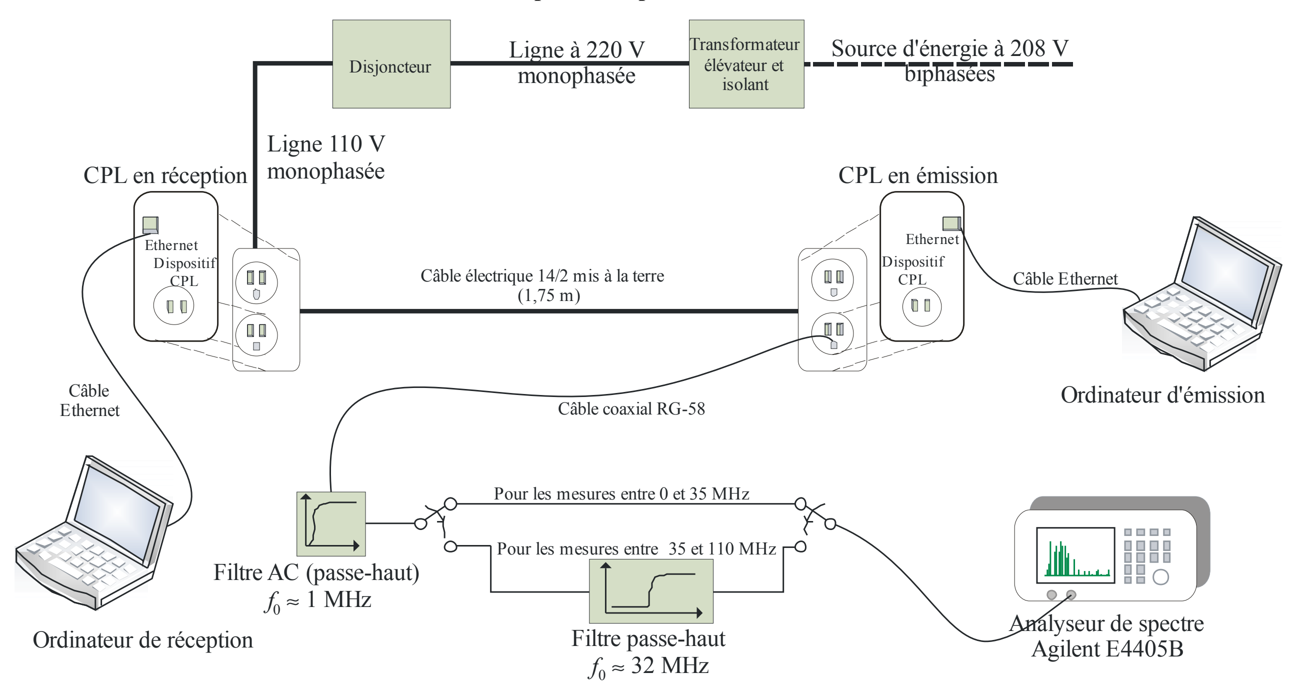
Liste des dispositifs CPL évalués en vue des essais sur le terrain

Numéro du dispositif	Fabricant	Modèle	Norme CPL	Spécifications du fabricant		
				Débit binaire (Mbit/s)	Gamme de fréquences en exploitation (MHz)	Région
1	TrendNet	TPL-202E	HomePlug 1.0 Turbo	85	4,5-21,0	Amérique du Nord
2	Panasonic	BL-PA100	HD-PLC	190	4,0-28,0	Amérique du Nord
3	Linksys	PLK200	HomePlug AV	100	Non spécifié	Amérique du Nord
4	NetGear	XE102GNA	HomePlug 1.0	14	4,3-20,9	Amérique du Nord
5	NetGear	XE103G-100NAS	HomePlug 1.0	85	4,3-20,9	Amérique du Nord
6	NetGear	HDX101-100NAS	UPA	200	2,0-30,0	Amérique du Nord
7	Logitec	LPL-TX/S	UPA	200	2,0-30,0	Japon
8	CNC	CNC-1000	HomePlug 1.0	85	4,3-20,9	Japon

Pour mesurer plus précisément les signaux de faible intensité, de fréquences supérieures à 30 MHz, un filtre passe-haut a été appliqué afin d'atténuer les principales porteuses CPL présentes dans l'intervalle des fréquences d'exploitation, ce qui a permis de mesurer des émissions jusqu'à 110 MHz sans surcharger l'analyseur de spectre. Comme le montre la Fig. A3-7, deux configurations ont été utilisées: l'une avec le filtre passe-haut, l'autre sans. Le filtre passe-haut, de marque Tin Lee Electronics Ltd., porte le numéro de modèle HP7 30/33(40) B50 et possède une fréquence de coupure de 32 MHz à –3 dB. Ce filtre n'a été utilisé que pour les mesures effectuées et enregistrées au-dessus de 35 MHz. La bande de résolution utilisée pour ces mesures était de 120 kHz.

FIGURE A3-7

Configuration utilisée pour mesurer la puissance transmise par conduction par les dispositifs CPL



Les mesures de la puissance transmise par conduction ont été réalisées sur un intervalle de fréquences compris entre 0 et 110 MHz selon deux modes opératoires: mode «transfert de données» d'une part et mode «repos» (sans transfert actif de données) d'autre part. L'objectif des essais était de déterminer le niveau de sortie injecté dans les lignes électriques jusqu'à 110 MHz dans les deux modes, ainsi que la largeur de bande et la forme spectrale des dispositifs CPL.

Pour obtenir une bonne précision, les mesures ont été faites de 0 à 110 MHz avec excursions en fréquences consécutives de largeur 10 MHz, l'analyseur de spectre étant réglé sur une bande de résolution de 9 kHz avec détection de crête. De façon générale, le niveau de référence de l'analyseur de spectre a été réglé sur la plus petite valeur ne produisant pas de surcharge spectrale. La discontinuité du bruit de fond observable à 35 MHz dans les résultats est due à l'utilisation d'un filtre passe-haut en vue d'améliorer la précision des mesures pour les fréquences supérieures à cette valeur.

La mesure du bruit de fond du banc d'essais est présentée à la Fig. A3-8. On voit que les lignes électriques dans la configuration de l'essai se sont comportées comme une antenne capturant les signaux d'autres systèmes de radiocommunication. Les raies situées entre 85 et 108 MHz proviennent ainsi de stations de radio FM locales. Les autres raies, à d'autres fréquences, étaient intermittentes et probablement dues à d'autres systèmes de radiocommunication. Lors de l'analyse des résultats concernant les émissions transmises par conduction, il a fallu tenir compte de ces raies de résonance.

Les résultats obtenus pour les dispositifs CPL 2, 3 et 6 sont présentés aux Figs A3-9, A3-10 et A3-11 respectivement. La courbe bleue correspond au signal transmis par conduction pendant un transfert de données et la courbe verte (généralement, la trace inférieure) le signal transmis par conduction en mode repos. Comme le montrent les figures, le niveau de signal en mode repos ne dépasse pas le niveau de signal en mode transfert de données. Par ailleurs, les dispositifs à l'essai ne se comportent pas de la même façon en mode repos: les dispositifs 2 et 3 émettent de temps à autre des porteuses pour maintenir le canal ouvert et synchronisé, alors que le dispositif 6 émet en

permanence dans la totalité de sa largeur de bande. Les résultats de mesure obtenus pour les autres dispositifs CPL figurent à l'Annexe A du Rapport du CRC, qui se trouve à l'addendum 1 de la présente annexe.

FIGURE A3-8

Bruit de fond du banc d'essais utilisé pour les mesures des signaux transmis par conduction

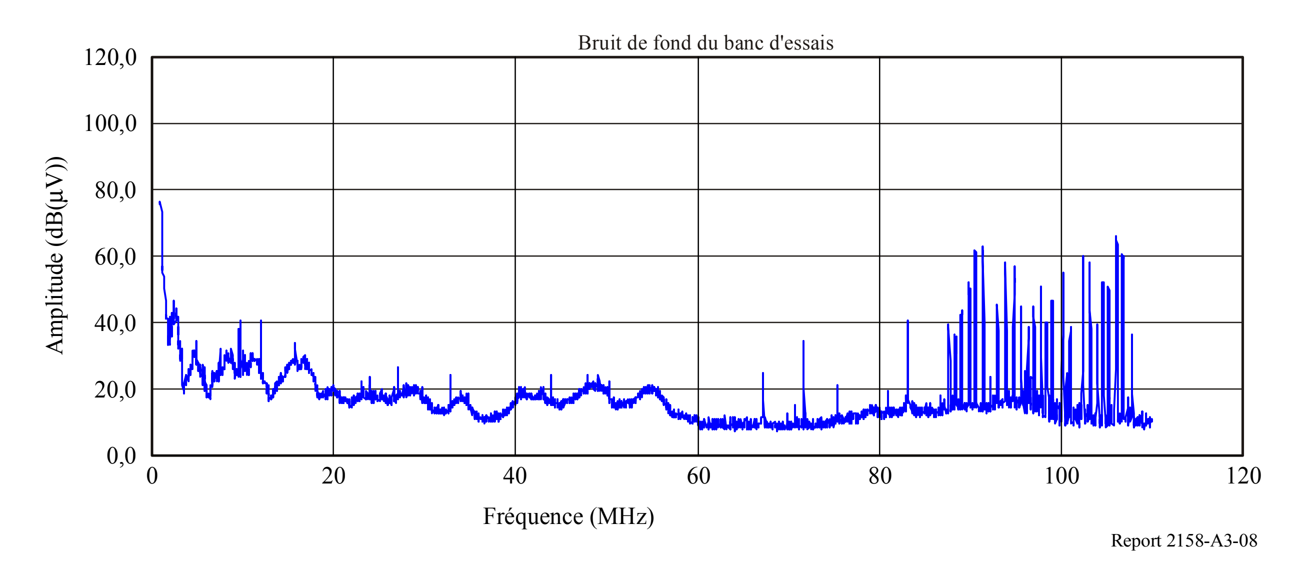


FIGURE A3-9

Puissance transmise par conduction par le dispositif 2 (norme HD-PLC)

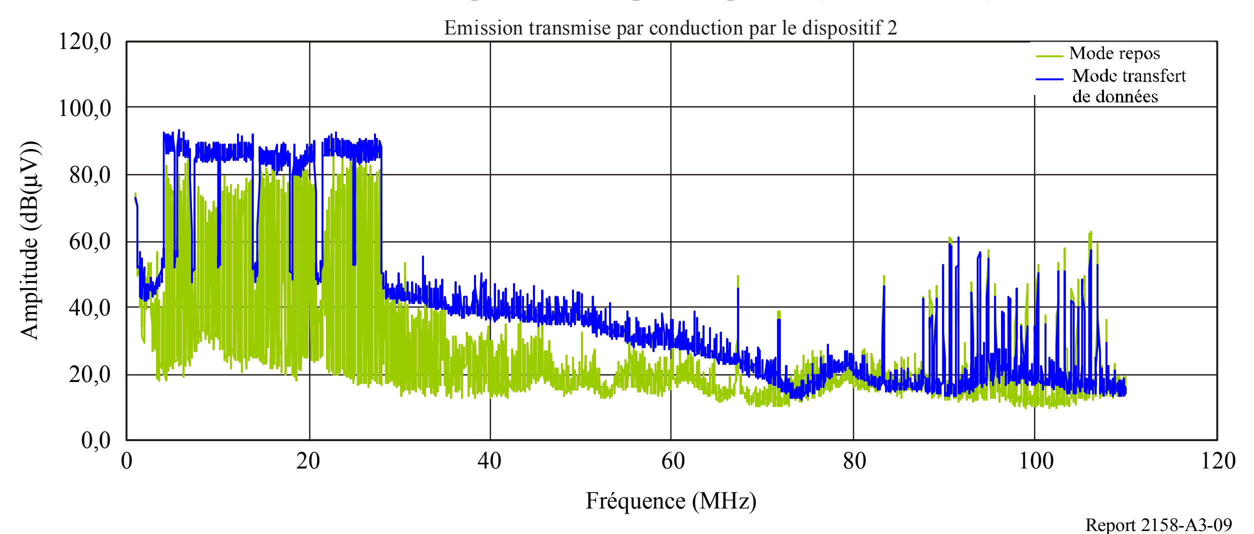


FIGURE A3-10

Puissance transmise par conduction par le dispositif 3 (norme Homeplug AV)

Emission transmise par conduction par le dispositif 3

Mode repos
Mode transfert de données

Amplitude (dB(µV))
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0

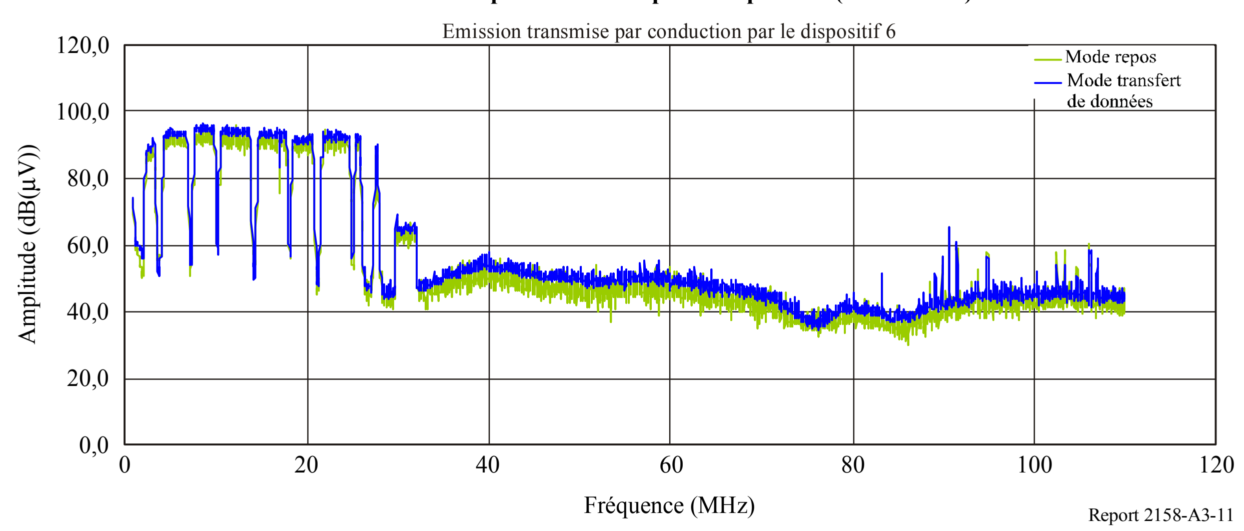
0 20 40 60 80 100 120

Fréquence (MHz)

Report 2158-A3-10

FIGURE A3-11

Puissance transmise par conduction par le dispositif 6 (norme UPA)



Les résultats le montrent, même lorsque le dispositif CPL ne transmet pas de données, il émet activement. On peut également observer qu'un dispositif CPL fonctionnant au-dessous de 30 MHz produit des émissions jusqu'à 80 MHz au minimum.

A3.2.3 Mesures de l'intensité de champ – procédure et résultats

Des mesures d'intensité de champ RF ont été effectuées sur des bâtiments résidentiels en rez-de-chaussée ou à un étage près d'Ottawa, Canada. La plupart des bâtiments étaient connectés au réseau de distribution électrique (220 V monophasé) par des lignes souterraines. Certains étaient cependant reliés par des lignes aériennes. Les bâtiments présentant un dégagement suffisant, les mesures de champ ont été réalisées à 3 m et à 10 m des murs extérieurs avant et arrière.

Comme le montre le Tableau A3-2, 17 bâtiments au total, couvrant plusieurs dispositions et divers matériaux de construction, ont été choisis pour les essais sur le terrain. Le tableau décrit chaque site de façon synthétique, en précisant notamment le type de bâtiment, le matériau de construction des murs extérieurs et le type de ligne électrique utilisé pour relier le bâtiment au réseau électrique de

proximité (lignes souterraines ou lignes aériennes). L'annexe du Rapport du CRC figurant dans l'addendum de la présente annexe fournit une description complète de l'ensemble des 17 sites, y compris des photographies et un schéma de chaque bâtiment.

TABLEAU A3-2

Description des sites qui ont servi aux essais sur le terrain

N° du site	**Type de bâtiment**	**Matériau de construction des murs extérieurs**				**Ligne électrique**
		Mur avant		**Mur arrière**		
		Rez-de-chaussée	**1er étage**	**Rez-de-chaussée**	**1er étage**	
1	Maison indépendante avec un étage	Brique	Vinyle	Vinyle		Souterraine
2	Maison indépendante avec un étage	Brique	Brique/Canaxel	Brique	Canaxel	
3(1)	Maison indépendante avec un étage	Brique	Brique/Vinyle	Vinyle		
4	Maison indépendante avec un étage	Brique	Brique	Brique	Aluminium	
5	Maison indépendante avec un étage	Brique		Brique	Aluminium	Souterraine
6	Maison en bande avec un étage	Brique	Brique/Vinyle	Vinyle		
7	Maison indépendante avec un étage	Brique		Vinyle		
8	Maison indépendante avec un étage	Brique		Vinyle		
9	Maison indépendante en rez-de-chaussée	Brique	n.d.	Vinyle	n.d.	
10	Maison en bande avec un étage	Brique	Aluminium	Aluminium	Aluminium	
11	Maison indépendante en rez-de-chaussée	Enduit extérieur en plâtre	n.d.	Enduit extérieur en plâtre	n.d.	
12	Maison indépendante avec un étage	Brique	Vinyle	Vinyle		Aérienne
13	Maison indépendante à mi-étages latéraux	Brique		Brique	Vinyle	Souterraine
14	Maison indépendante avec un étage	Brique	Bardeau	Brique	Bardeau	Aérienne
15	Maison indépendante avec un étage	Brique	Aluminium	Brique	Aluminium	

TABLEAU A3-2 (*fin*)

N° du site	Type de bâtiment	Matériau de construction des murs extérieurs				Ligne électrique
		Mur avant		Mur arrière		
		Rez-de-chaussée	1er étage	Rez-de-chaussée	1er étage	
16	Maison indépendante avec un étage	Brique	Brique/Bardeau	Vinyle		Souterraine
17	Maison indépendante avec un étage et combles	Brique	Brique/Vinyle	Vinyle		

(1) Les données du site 3 n'ont pas été utilisées dans l'analyse, car des dispositifs CPL en service dans une maison adjacente ont faussé les résultats des essais.

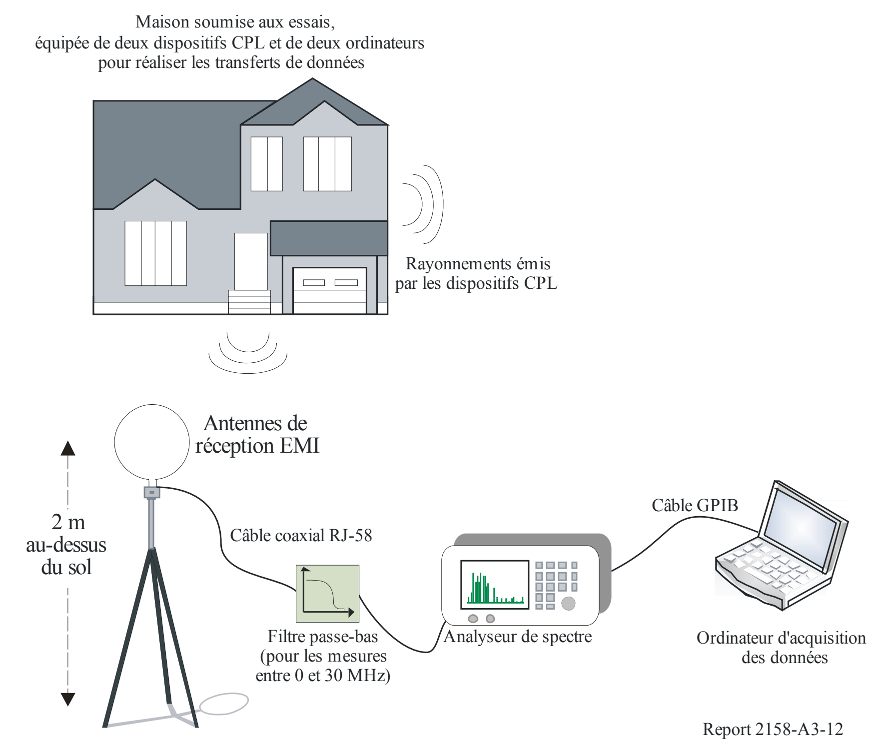
Les dispositifs CPL (2, 3 et 6) ont été testés par paires du même modèle et connectés à des prises de courant alternatif à l'intérieur des habitations. Dans chaque maison, les deux dispositifs ont été placés loin l'un de l'autre pour reproduire une configuration réaliste de réseau privé. L'un des dispositifs a été placé dans une pièce située à l'avant de la maison et l'autre dans une pièce située à l'arrière. Dans les maisons disposant d'un étage, l'un des deux dispositifs a été placé au rez-de-chaussée et l'autre au premier étage. Chaque dispositif était connecté à un ordinateur personnel. Les deux modes de fonctionnement CPL ont été testés: le mode transfert de données dans toutes les maisons et le mode repos dans certaines maisons seulement. Pour le mode transfert de données, les mesures ont été réalisées pendant le transfert d'un gros fichier entre les deux ordinateurs. Des mesures de référence du bruit ambiant ont également été effectuées à chaque emplacement de mesure.

Pour les fréquences comprises entre 0 et 30 MHz, le champ RF a été mesuré à l'aide d'une antenne-cadre passive étalonnée (EMC Test Systems, modèle 6512) et, pour les fréquences situées entre 30 et 108 MHz, à l'aide d'une antenne doublet passive étalonnée (A.H. Systems Inc., modèle symétriseur SAS-530 et éléments repliables SAS-542). Le facteur de ces antennes a été précisément étalonné pour fournir des mesures de l'intensité de champ RF en (dB(μV/m)). Les antennes ont été placées à 2 m au-dessus du niveau du sol et les mesures ont été effectuées à 3 m et à 10 m des murs extérieurs avant et arrière des habitations.

La Fig. A3-12 illustre la configuration de l'essai utilisée pour les mesures de l'intensité de champ RF. Un filtre passe-bas (Tin Lee Electronics Ltd., modèle LP7E-30-37 B50, fréquence de coupure de 31 MHz à –1 dB, fréquence de coupure de 35 MHz à –40 dB) a été connecté entre l'antenne et de l'analyseur de spectre pour supprimer les signaux de forte puissance dans la bande des fréquences métriques (stations FM et TV) lors des mesures au-dessous de 30 MHz de façon à ne pas surcharger l'analyseur.

FIGURE A3-12

Configuration utilisée pour les mesures de l'intensité de champ RF



Les mesures des maxima et des minima du bruit ambiant moyen (tension linéaire moyenne convertie en décibels) pour les 16 sites soumis aux essais sont présentées à la Fig. A3-13. A noter qu'à certaines fréquences, la contribution du bruit ambiant aux mesures de champ n'était pas négligeable. La plupart des raies de résonance importantes viendraient de stations d'amateurs ou de stations émettant en ondes courtes. D'autres sources de bruit, telles que des moteurs électriques (chaudières, réfrigérateurs et autres appareils ménagers), ont éventuellement aussi contribué à l'élévation du bruit ambiant.

A des fins d'analyse des champs RF mesurés, toutes les mesures effectuées sur les 16 maisons ont été regroupées en fonction des dispositifs CPL utilisés et des distances de mesure par rapport aux habitations. A noter que le site 3 n'a pas été inclus dans cette analyse statistique en raison de brouillages provenant de dispositifs CPL en service dans le voisinage. Les Figs A3-14 à A3-19 présentent les analyses statistiques pour trois dispositifs. Chacune montre l'intensité de champ RF maximale, minimale et moyenne pour chaque dispositif. En outre, les mesures effectuées sur les 16 maisons ont permis de calculer un intervalle de confiance, qui est censé représenter le champ maximal prévisible rayonné par des dispositifs CPL installés dans des habitations types. Un intervalle de confiance de 95% du champ RF a été calculé à partir de l'écart type de l'échantillon constitué par les 16 maisons, en considérant une distribution normale. Les limites supérieure et inférieure de cet intervalle de confiance sont matérialisées dans les figures. Dans cette analyse statistique, les calculs ont été effectués avec des valeurs linéaires. Comme indiqué ci-dessus, la contribution des brouillages provenant de sources autres que les dispositifs CPL n'est pas négligeable et ne peut être éliminée de l'analyse statistique.

FIGURE A3-13

Distribution du bruit ambiant moyen à 3 m et à 10 m pour les 16 sites soumis aux essais

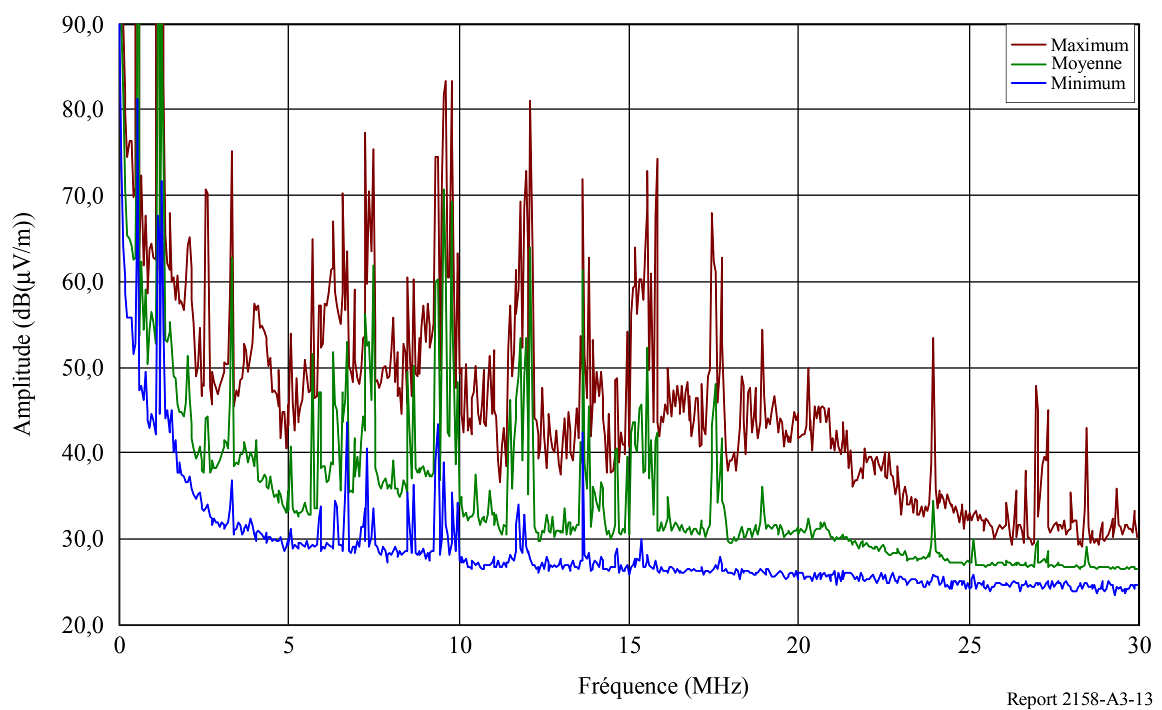


FIGURE A3-14

Distribution de l'intensité de champ RF, dispositif CPL 2 (HD-PLC) à 3 m

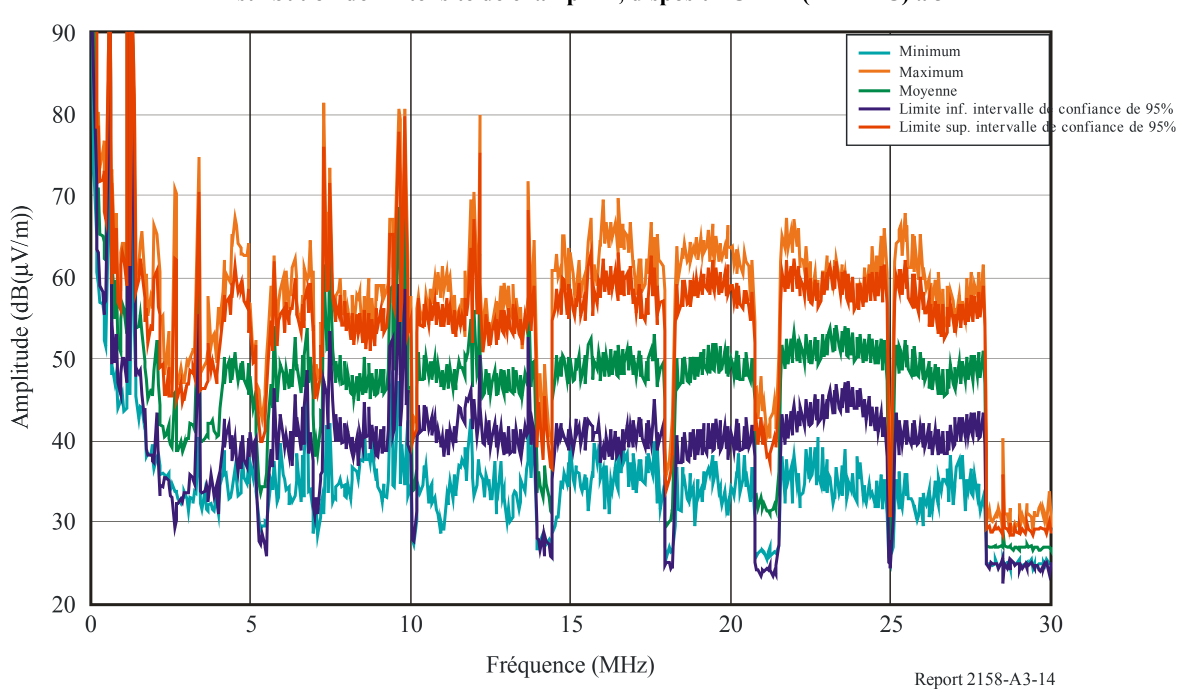


FIGURE A3-15

Distribution de l'intensité de champ RF, dispositif CPL 2 (HD-PLC) à 10 m

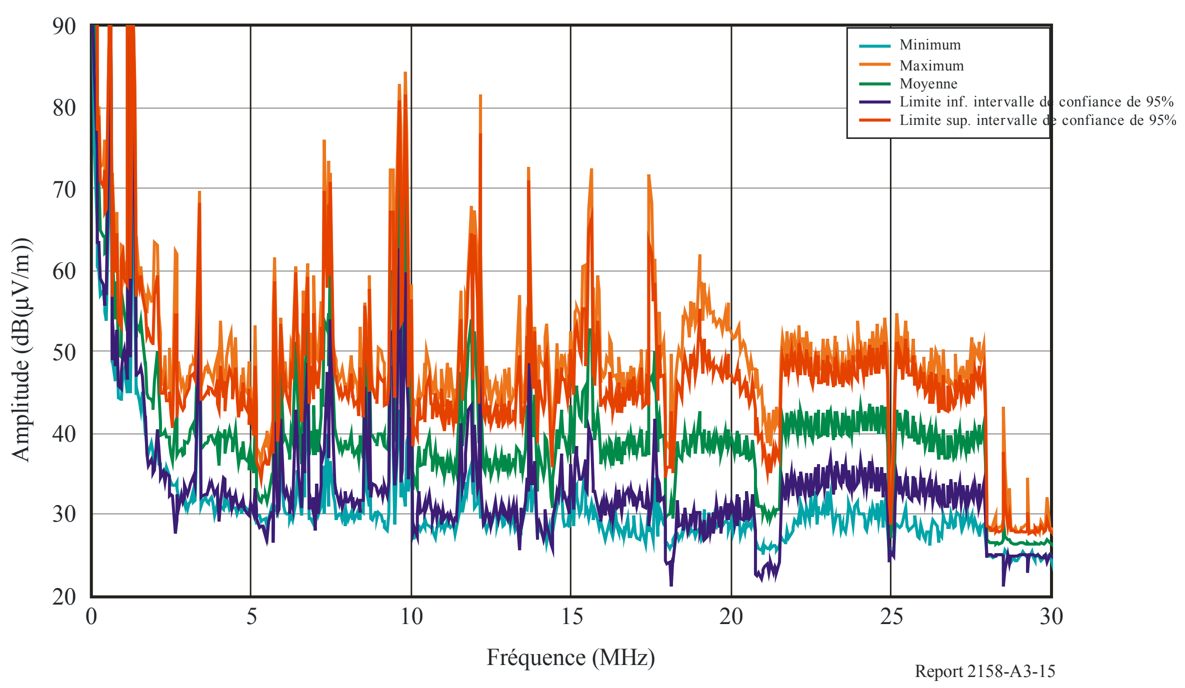


FIGURE A3-16

Distribution de l'intensité de champ RF, dispositif CPL 3 (Homeplug AV) à 3 m

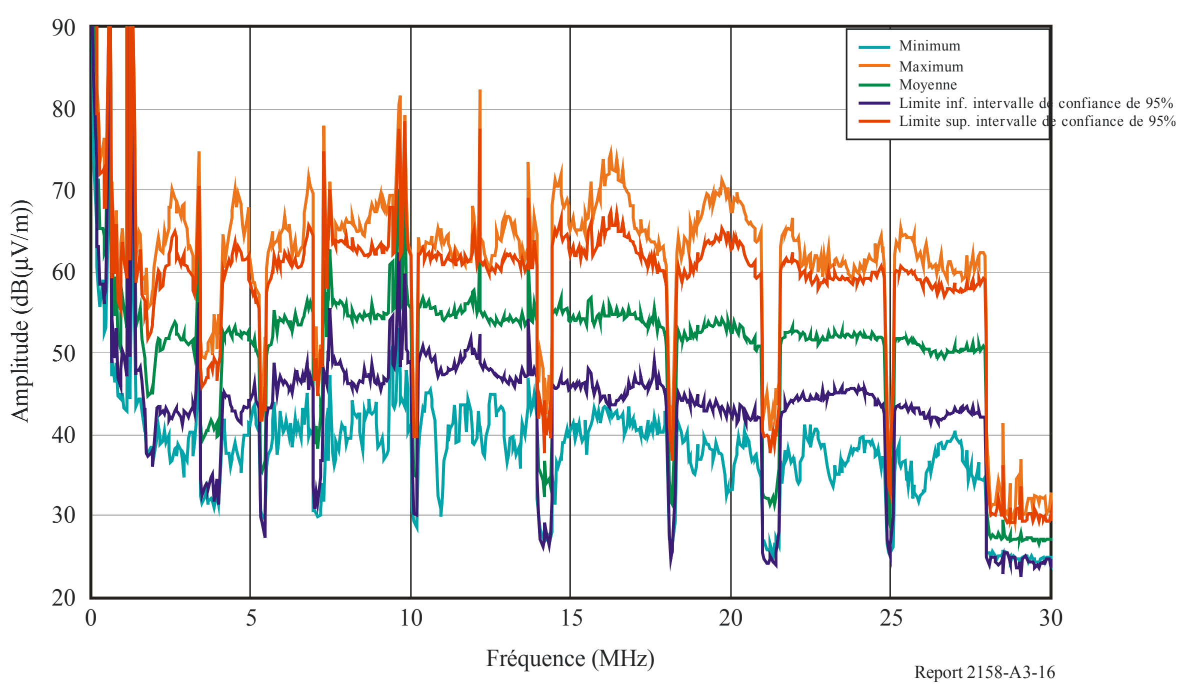


FIGURE A3-17

Distribution de l'intensité de champ RF, dispositif CPL 3 (Homeplug AV) à 10 m

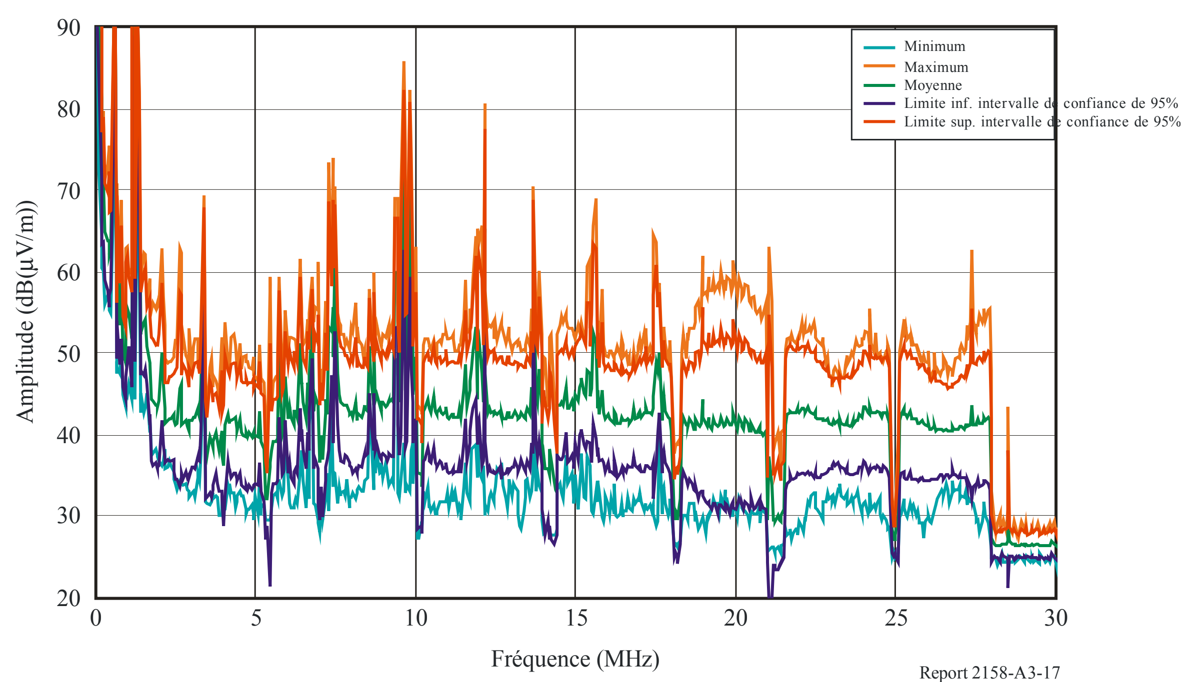


FIGURE A3-18

Distribution de l'intensité de champ RF, dispositif CPL 6 (UPA) à 3 m

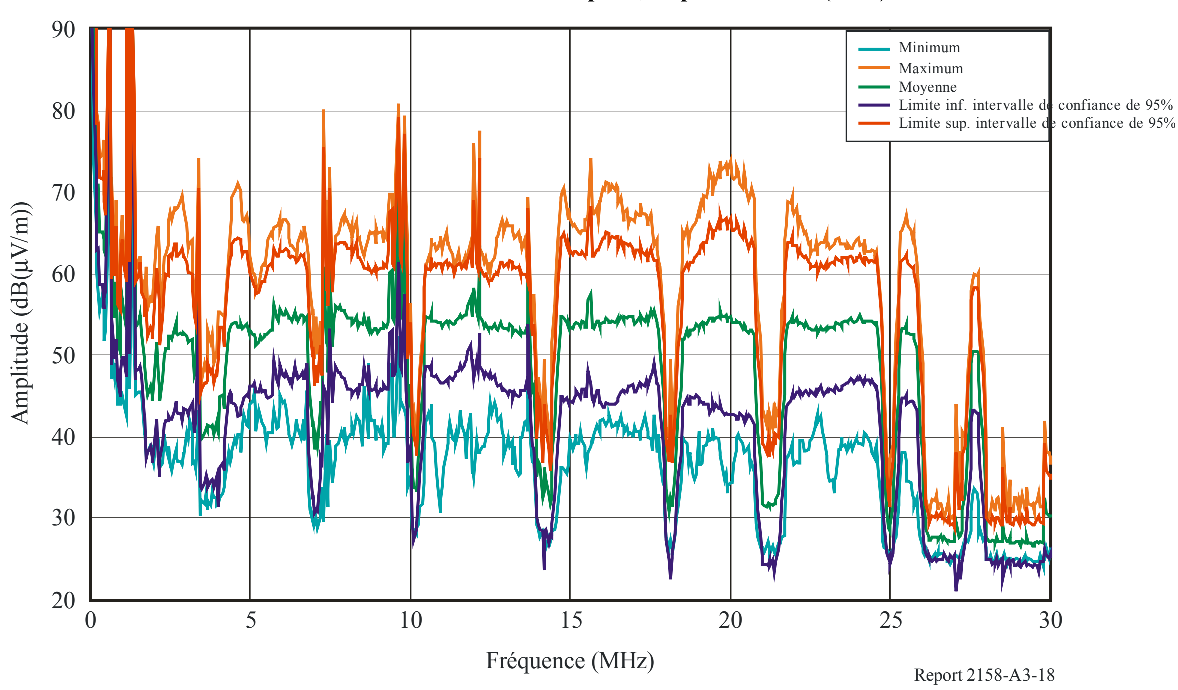
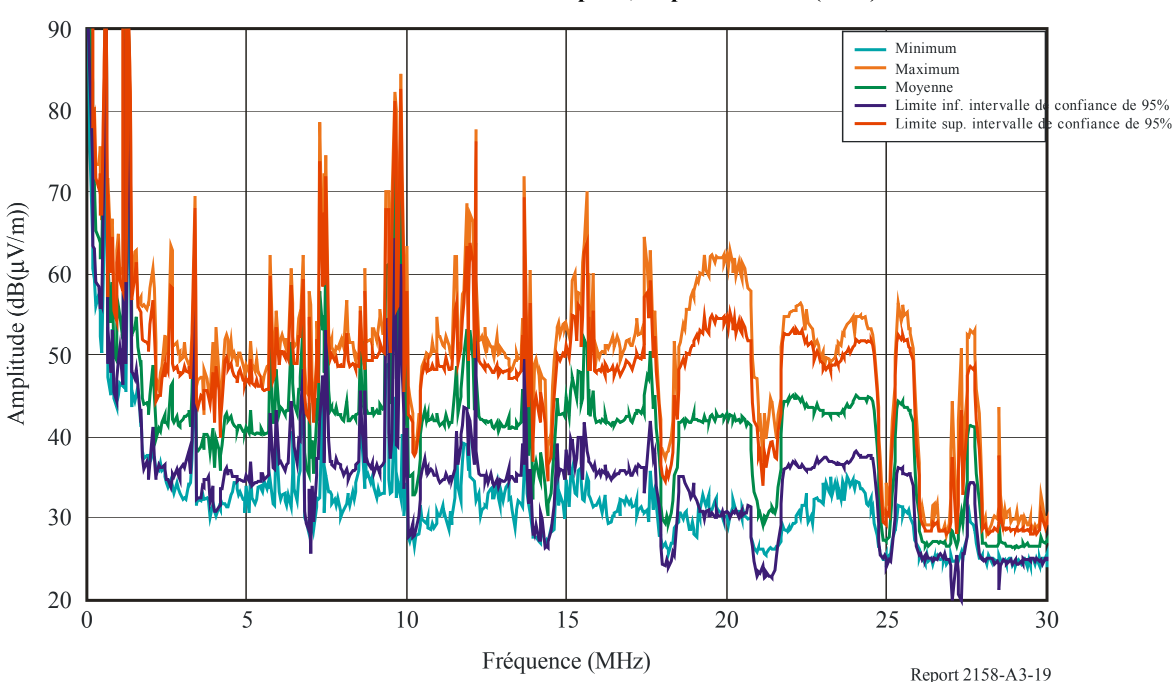


FIGURE A3-19

Distribution de l'intensité de champ RF, dispositif CPL 6 (UPA) à 10 m



A3.2.4 Conclusions

Les résultats des essais effectués par le CRC en laboratoire et sur le terrain montrent que les rayonnements maximum provenant de dispositifs CPL installés dans une maison résidentielle type dépassent les niveaux de bruit ambiant moyens de plus de 30 dB à 10 m et de plus de 40 dB à 3 m du mur extérieur de l'habitation. A 10 m, les rayonnements moyens provenant des CPL dépassent le bruit ambiant moyen de 5 à 10 dB environ. A certaines fréquences et à certaines distances, les rayonnements CPL volontairement filtrés affichent un niveau inférieur au bruit ambiant. Par conséquent, ainsi que l'observe le CRC, les dispositifs CPL sont susceptibles de brouiller les services de radiocommunication, notamment ceux qui fonctionnent selon le principe d'une limitation par le bruit. Le service de radiodiffusion est particulièrement vulnérable aux brouillages causés par des systèmes CPL. Les facteurs de planification du service de radiodiffusion prévoient une réception à des intensités de champ très inférieures à celles envisageables en présence de rayonnements causés par des dispositifs CPL. Par exemple, la Recommandation UIT-R BS.703 fixe l'intensité de champ utilisable minimale pour un récepteur de radiodiffusion moyen en ondes décamétriques à 40 dB(µV/m). Or les résultats de l'essai du CRC présentés ici montrent que les dispositifs CPL produisent des niveaux de brouillage supérieurs de 20 à 30 dB au niveau de signal attendu pour ce type de récepteur, l'intensité des brouillages dépendant de la fréquence, de la distance de séparation, de la configuration de l'antenne du récepteur ainsi que d'autres facteurs.

A3.3 Résultats des mesures de rayonnements causés par des systèmes CPL de type *Indoor* dans un environnement de type résidentiel effectuées lors d'un essai mené au Japon

A3.3.1 Introduction

La présente section rend compte des résultats de mesures de rayonnements causés par des systèmes CPL de type *Indoor* dans un environnement de type résidentiel effectuées lors d'un essai mené au Japon.

A3.3.2 Méthode de mesure

Les rayonnements émis par des systèmes CPL de type *Indoor* ont été mesurés à proximité d'une maison dans les conditions décrites ci-après. Deux types de dispositifs CPL ont été utilisés pendant les essais: l'un mettant en œuvre la technique de modulation à étalement de spectre et l'autre la modulation MROF.

a) Equipements de mesure

- *Antenne*: antenne-cadre étalonnée;
- *Analyseur de spectre*: l'analyseur de spectre doit être réglable et fonctionner sur batteries comme indiqué à la note 1.

NOTE 1 – Lors des mesures sur le terrain, le bruit provenant des câbles d'alimentation des équipements de mesure ou des câbles utilisés pour les mesures peut entraîner des problèmes de reproductibilité. Un fonctionnement sur batteries est donc souhaitable. Lorsque cela n'est pas possible, il convient d'utiliser une source d'énergie indépendante et de veiller tout particulièrement au positionnement des câbles d'alimentation.

b) Positionnement des équipements de mesure

- Points de mesure situés à 5 m des murs extérieurs de l'habitation et dans 8 directions différentes. (S'il est impossible de réaliser cette configuration en raison de caractéristiques topographiques ou de contraintes d'espace (espacement de 5 m impossible à respecter), le nombre de points de mesure pourra être réduit jusqu'à 4).
- La distance de 5 m est mesurée par rapport au mur externe le plus proche.
- L'antenne est placée à 1 m au-dessus du niveau du sol (mesure par rapport au bas de l'antenne-cadre).

c) Intervalle de fréquence des mesures

- de 1 à 30 MHz.

d) Réglage de l'équipement de mesure (analyseur de spectre)

- Bande passante de résolution = 10 kHz, bande passante vidéo = 100 kHz, excursion en fréquence = 29 MHz, fréquence centrale = 15,5 MHz
- Point = environ 1 000 points, Balayage = Auto
- Mode de détection: RMS
- Moyennage: plus de 20 valeurs dans le mode de détection ci-dessus.

A3.3.3 Configuration de la communication CPL

a) Maison

Utiliser une maison type.

- Décrire la construction bois/non bois, maison familiale individuelle (nombre d'étages)/appartement.
- Mesurer le système CPL en dehors de toute utilisation domestique; effectuer des mesures en environnement réel.

b) Mesurer plus de 2 trajets de distribution dans une même maison (voir Fig. A3-21).

- Si la maison a plusieurs étages, il est recommandé d'utiliser le trajet de distribution vers un autre étage.

c) Configuration des mesures

- Configuration 1: aucun système CPL dans la maison.
- Configuration 2: installation d'un système CPL et communication à vitesse maximale via UDP en utilisant un logiciel de transfert type FTP. (Unidirectionnel)

d) Autres conditions

Mesurer le bruit en environnement d'utilisation réel, sans retirer les autres équipements électroniques ou d'éclairage. Ne pas éteindre ou allumer ces équipements pendant les mesures.

FIGURE A3-20

Positionnement des équipements de mesure

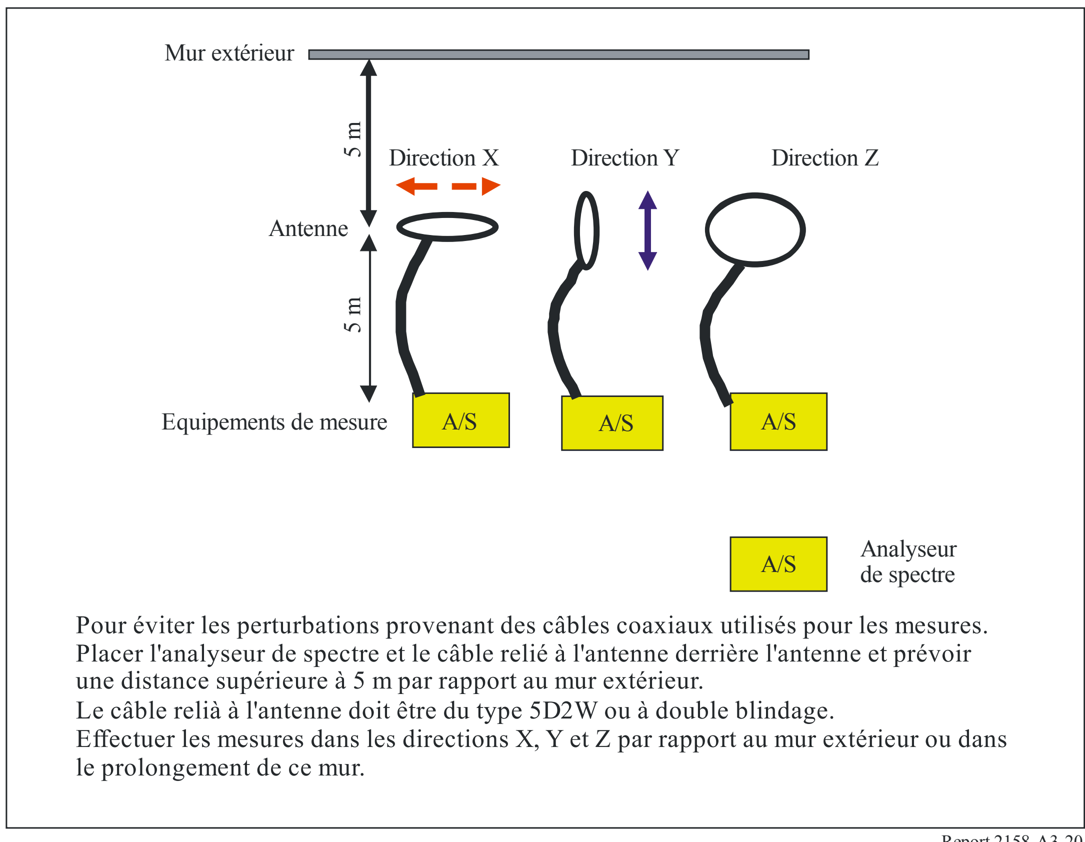
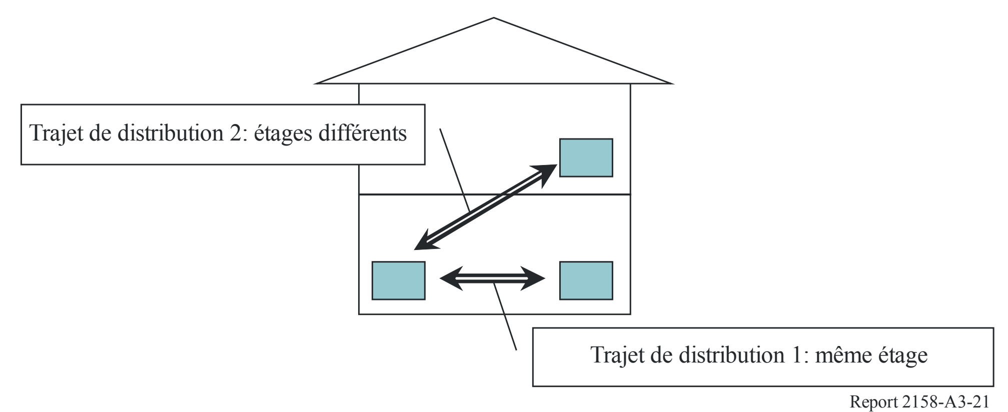


FIGURE A3-21

Exemple deux trajets de distribution



A3.3.4 Résultat des mesures

TABLEAU A3-3

Configuration des mesures

	Type des dispositifs CPL	**MROF**	**Etalement de spectre**
Configuration des mesures	Catégorie d'habitation	Construction en bois	Construction autre que bois
	Maison familiale individuelle/appartement	Maison familiale individuelle/1 étage	Bâtiment (école à 3 étages)
	Prise de courant alternatif sur laquelle est branché le système CPL	Voir Fig. A3-22	Voir Fig. A3-23
	Gamme de fréquences du système CPL	4 MHz-28 MHz	4 MHz-20 MHz
	Application du système CPL	Pour particulier	Pour l'industrie
Equipements de mesure	Analyseur de spectre	Agilent E7401A	Agilent E4402B
	Antenne-cadre	EMCO 6502	EMCO 6502

Les Figs A3-24 et A3-25 présentent les résultats de mesure du système MROF et les Figs A3-26 et A3-27 les résultats du système à étalement de spectre.

Les Figs A3-24 à A3-27 présentent les résultats des mesures dans les directions X et Y aux points de détection des rayonnements causés par les systèmes MROF et à étalement de spectre, ainsi qu'au niveau d'un point voisin.

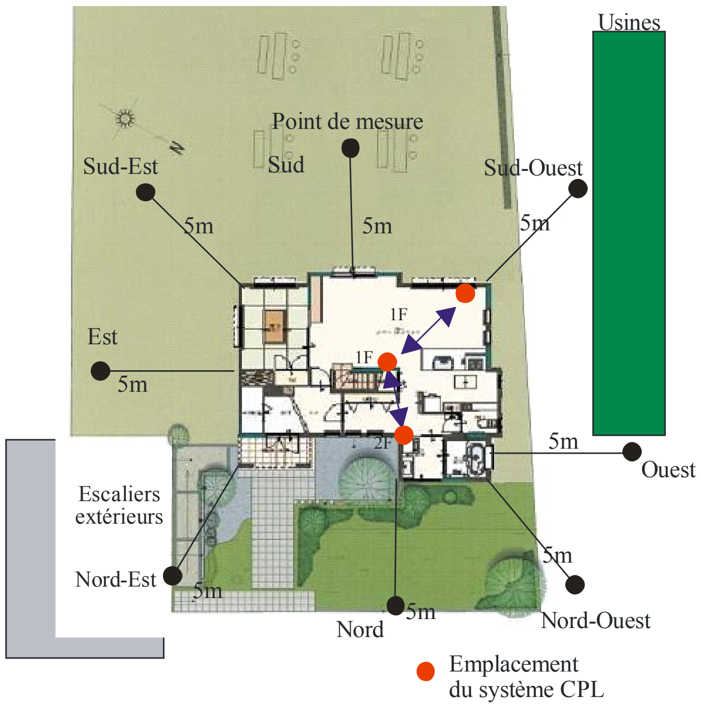
Les spectres d'impulsion, qui correspondent à des ondes de radiodiffusion ou à du bruit provenant d'appareils électroniques grand public, sont observables à tout moment, même en l'absence de systèmes CPL en service. Les systèmes CPL émettent en permanence dans la bande de fréquences comprises entre 2 et 30 MHz (à l'exception des intervalles de fréquences utilisées par la radio amateur). Aussi le spectre d'émission des systèmes CPL n'est-il pas impulsionnel: il est perçu comme un bruit à large bande.

Les résultats de mesure indiquent que les rayonnements mesurés en un même point diffèrent selon la direction d'observation, X ou Y. De plus, les rayonnements mesurés au niveau des points de mesure adjacents sont également différents.

Les résultats de mesure montrent par ailleurs que les rayonnements des systèmes CPL et du réseau électrique ne sont pas omnidirectionnels, mais qu'ils possèdent en effet des caractéristiques directionnelles. Autrement dit, les rayonnements sont observables dans une certaine direction seulement.

FIGURE A3-22

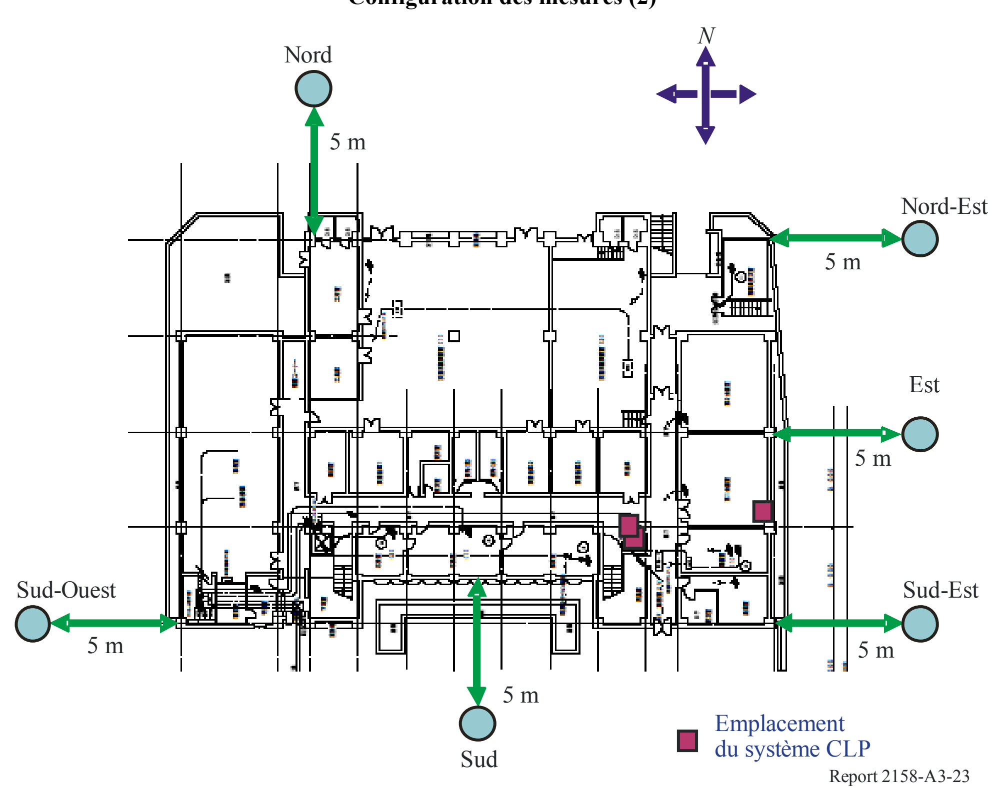
Configuration des mesures (1)



Report 2158-A3-22

FIGURE A3-23

Configuration des mesures (2)



Report 2158-A3-23

FIGURE A3-24

Trajet de distribution 2 pour une modulation MROF, Est, 5 m

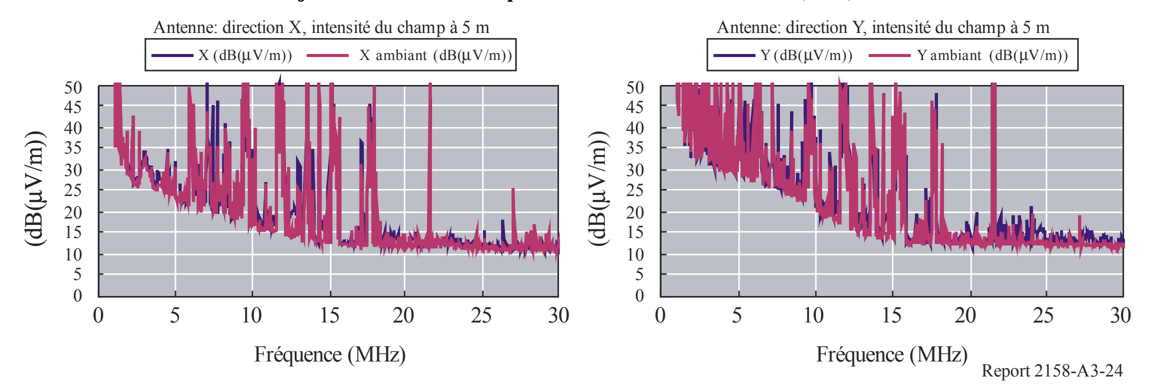


FIGURE A3-25

Trajet de distribution 2 pour une modulation MROF, Sud-Est, 5 m

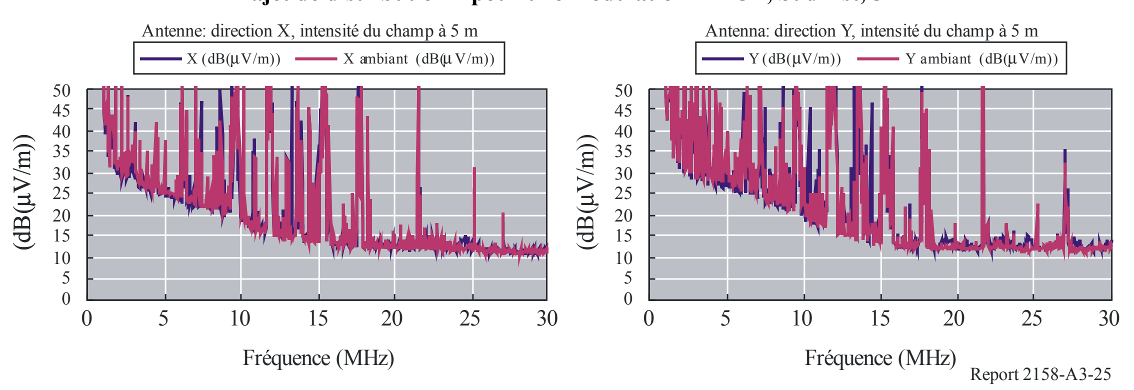


FIGURE A3-26

Trajet de distribution 4 pour une modulation par étalement de spectre, Nord-Est, 5 m

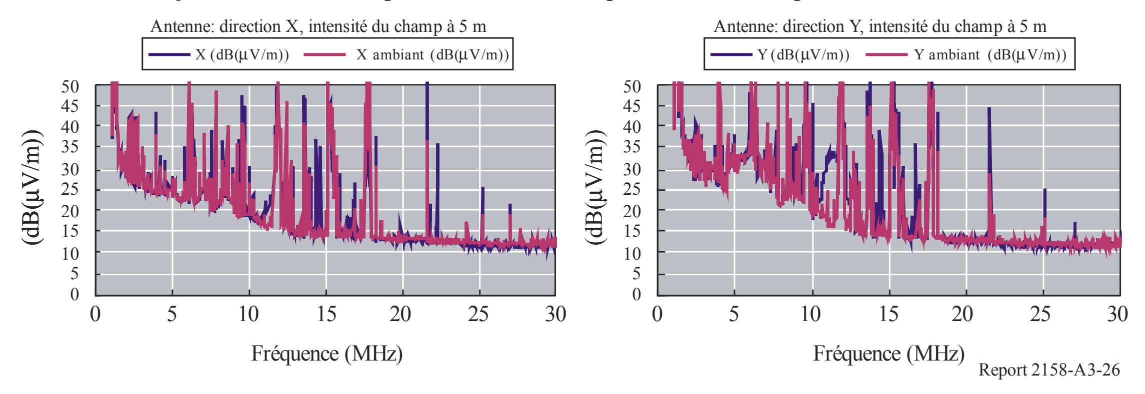
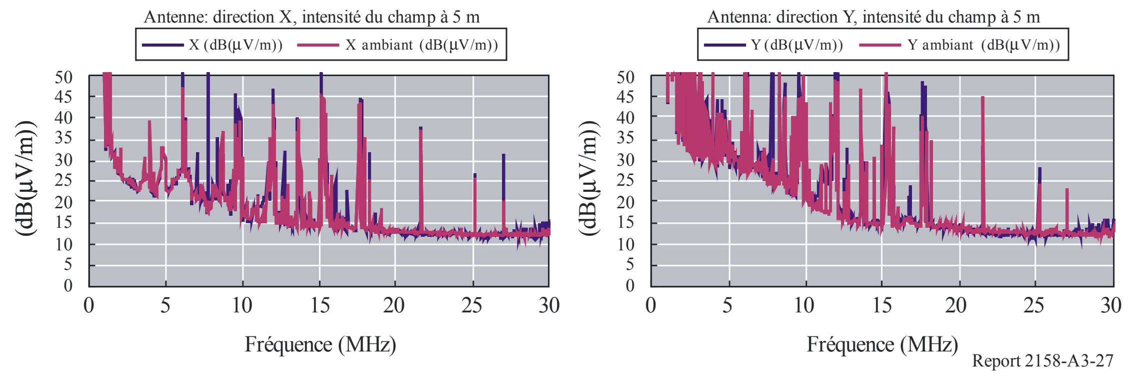


FIGURE A3-27

Trajet de distribution 4 avec modulation par étalement de spectre 4-4, Nord, 5 m



A3.4 Résultats de mesure de fuites d'émission provenant de systèmes de courants porteurs en ligne (CPL) dans les bandes de fréquences décamétriques et décimétriques

A3.4.1 Introduction

Récemment, des équipements CPL à haut débit atteignant des vitesses de transmission de quelques Mbit/s à environ 200 Mbit/s ont été développés et l'on trouve des systèmes CPL à large bande dont la fréquence d'exploitation atteint 80 MHz. Or, les lignes électriques n'étant pas conçues pour les télécommunications mais pour la distribution d'énergie 50/60 Hz, elles sont susceptibles d'émettre des niveaux élevés de bruit électromagnétique. Il se trouve par ailleurs que de nombreuses stations radio du service de radiodiffusion, du service d'amateur, du service aéronautique, du service de radioastronomie, etc. exploitent les bandes de fréquences décamétriques et décimétriques inférieures à 80 MHz. Si les modems CPL utilisant les fréquences inférieures à 80 MHz étaient généralisés, de larges parties du spectre HF/VHF pourraient devenir inutilisables. La bande des fréquences décamétriques est également utilisée par les scientifiques pour observer les environnements terrestres et les objets astronomiques. Etant donné que les signaux reçus des sources astronomiques sont généralement de très faible intensité, les rayonnements causés par les CPL pourraient sérieusement remettre en cause les observations radioastronomiques sensibles, non seulement dans la gamme des fréquences inférieures à 80 MHz, mais aussi dans des bandes de fréquences supérieures, y compris dans les bandes d'ondes décimétriques, en raison de la présence éventuelle d'harmoniques et/ou d'effets d'intermodulation dans les signaux CPL utiles.

Ces problèmes ont été étudiés par le groupe d'étude CPL, d'avril à juillet 2002, sous l'égide du ministère japonais de l'Intérieur et des Télécommunications (MIC). Le groupe d'étude a organisé un groupe de travail chargé de préparer et de réaliser des essais collaboratifs sur le terrain, là où sont installées des infrastructures CPL. Les essais ont été réalisés les 8-9 et 22-23 juillet 2002 sur le mont Akagi, préfecture de Gunma, Japon. Au cours des essais, nous avons mesuré les fuites d'émission causées par des modems CPL dans les bandes de fréquences décamétriques et décimétriques en vue d'évaluer l'incidence sur les observations radioastronomiques de l'élargissement de la largeur de bande des CPL et de rechercher la présence de rayonnements non essentiels dans les fréquences supérieures. Le présent article rend compte des résultats expérimentaux des essais réalisés sur le terrain et compare les niveaux de bruit CPL mesurés avec les seuils de brouillages préjudiciables aux observations radioastronomiques spécifiés dans la Recommandation UIT-R RA.769.

A3.4.2 Essais sur le terrain effectués sur le mont Akagi, Japon, le 23 juillet 2002

La Fig. A3-28 présente la configuration de l'essai sur le terrain. Pour cette expérience, des lignes ont été tirées entre plusieurs poteaux électriques (poteaux n° 1, n° 2 et n° 3 à la Fig. A3-28) et une maison type. Les deux paires de modems CPL décrites au Tableau A3-4 ont été utilisées. Les mesures de fuites d'émission ont été réalisées dans les bandes de fréquences décamétriques et décimétriques. Les modems CPL et les ordinateurs portables étaient connectés aux lignes électriques situées à l'extérieur, au niveau du poteau n° 2. Les puissances de sortie des modems CPL 1/2 et 3/4 sont présentées aux Figs A3-29 et A3-30 respectivement[59].

A noter que trois paires de modems CPL de type *Indoor* ont également été préparées sur le site de l'essai. Ces modems n'ont pas été utilisés pour les mesures qui font l'objet du présent article.

FIGURE A3-28

Carte du site de l'essai

T2FD N° 2
180 m
T2FD N° 1
57 m
UHF N° 2 55m
UHF N° 1 35m
Maison type
Poteau N° 1
Poteau N° 2
Poteau N° 3

Report 2158-A3-28

[59] Pièce jointe n° 3 du Rapport technique du groupe d'étude CPL à haut débit, ministère japonais de l'Intérieur et des Télécommunications (MIC), août 2002.

TABLEAU A3-4

Modems CPL de type *Access* utilisés pour les essais sur le terrain

N°	Type de modulation	Gamme de fréquences (MHz)	Puissance de sortie nominale (dBm/Hz)	Impédance de sortie nominale (Ω)	Fréquence de coupure (MHz)
1/2	MROF	4,3-20,9	–50	100 <=	7,000-7,300 10,100-10,150 14,000-14,350 18,068-18,168 21,000-21,450
3/4	Etalement de spectre	4,0-20,0	–50	50 <=	7,000-7,300 9,800-10,300 13,900-14,400 17,850-18,350

FIGURE A3-29

Puissance de sortie du modem CPL 1/2

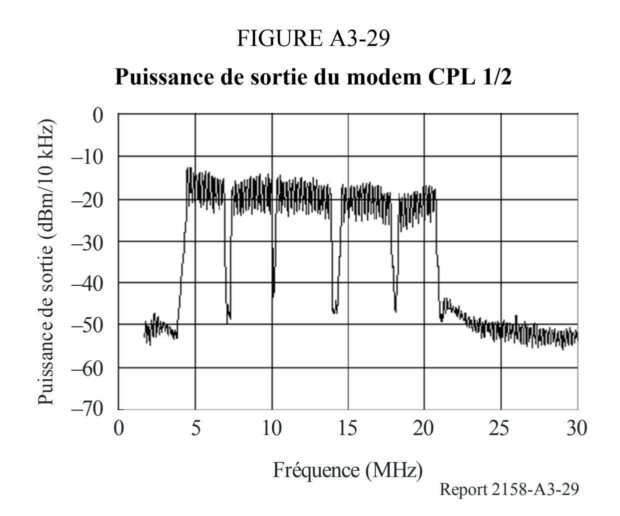
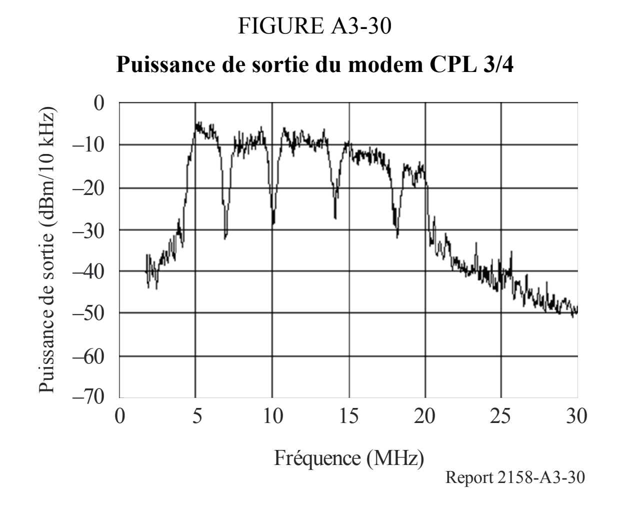


FIGURE A3-30

Puissance de sortie du modem CPL 3/4



Pour les mesures dans la bande des fréquences décamétriques, deux jeux d'antennes T2FD équivalentes de 25 m de long ont été installées à 57 m et à 180 m du poteau n° 2 (respectivement T2FD n° 1 et n° 2 à la Fig. A3-28). Les antennes étaient placées à environ 5 m au-dessus du sol. A noter que ces antennes T2FD étaient positionnées horizontalement et qu'elles n'étaient donc pas sensibles à la composante verticale du champ électrique. Il est donc possible qu'elles n'aient pas reçu la totalité de la puissance de bruit émise par les systèmes CPL. La sortie des antennes était directement connectée à un analyseur de spectre capable de mesurer une puissance électrique jusqu'à 30 MHz. S'agissant des mesures quantitatives, 10 traces spectrales ont été obtenues pour chaque mesure de spectre et les écarts de mesures ont été évalués.

Pour étudier les rayonnements non essentiels émis par les équipements CPL, une antenne log-périodique (Create Design, CLP-5130-1) et un récepteur ont été installés à 55 m du poteau n° 2 (UHF n° 2 à la Fig. A3-28) et déplacés à 35 m du même poteau (UHF n° 1) pour quelques mesures. Le récepteur consistait en un filtre passe-haut, un préamplificateur à faible bruit et un amplificateur large bande. Le préamplificateur avait un gain de puissance de 40 dB à la fréquence centrale de 327 MHz, une largeur de bande d'environ 20 MHz et une valeur de bruit minimal de 0,8 dB. Le filtre passe-haut, dont la fréquence de coupure était située à 260 MHz, avait pour rôle d'empêcher la

saturation du préamplificateur par des signaux de radiodiffusion de forte puissance dans la bande des fréquences métriques. Les spectres au voisinage de 327 MHz mesurés par les analyseurs étaient automatiquement enregistrés sur un ordinateur portable via une interface GPIB. Pour s'assurer que les rayonnements non essentiels étaient effectivement dus aux équipements CPL, les spectres HF ont été mesurés simultanément et l'on a étudié les dépendances de ces rayonnements avec la distance et la direction par rapport aux équipements CPL.

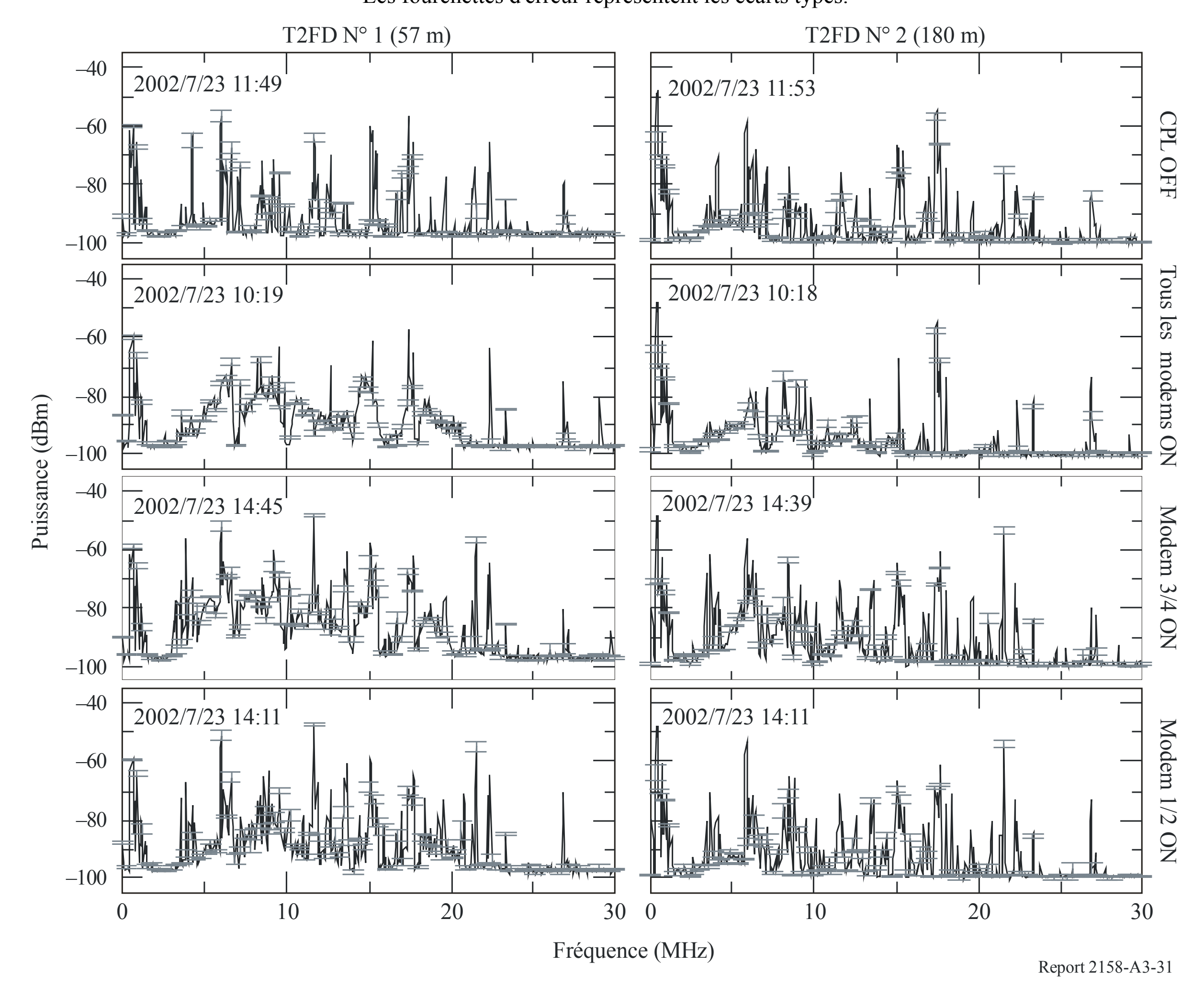
A3.4.3 Fuite d'émissions dans la bande des fréquences décamétriques

La Fig. A3-31 présente les résultats des mesures spectrales dans la bande des fréquences décamétriques. En l'absence d'activité des modems CPL, de nombreux signaux de radiodiffusion apparaissent au-dessus d'un plancher de bruit blanc, qui représente le niveau de bruit de l'analyseur de spectre. Après la mise en route des modems, le niveau du plancher de bruit augmente de façon significative dans la gamme des fréquences comprises entre 4 et 20 MHz. On peut observer, dans ce plancher de bruit augmenté, des diminutions brutales au voisinage de 7, 10, 14 et 18 MHz, qui correspondent aux fréquences de coupure des modems (voir le Tableau A3-4), ce qui prouve que les modems CPL sont bien à l'origine de l'augmentation du plancher de bruit. Les deux types de modems (n° 1/2 à modulation MROF et n° 3/4 à modulation par étalement de spectre) produisent des augmentations importantes du plancher de bruit, l'augmentation étant supérieure de 5 dB environ dans le cas des modems par étalement de spectre. Comme le montre la Fig. A3-31, de nombreux signaux de radiodiffusion ont été brouillés – et certains totalement masqués – par le bruit provenant des équipements CPL.

FIGURE A3-31

Spectres dans la bande des fréquences décamétriques mesurés par les antennes T2FD n° 1 (à gauche) et n° 2 (à droite)

Cadres de la 1re rangée: systèmes CPL non actifs;
Cadres de la 2e rangée: tous les systèmes CPL sont allumés;
Cadres de la 3e rangée: seuls les modems 3 et 4 sont actifs;
Cadres de la 4e rangée: seuls les modems 1 et 2 sont actifs;
Les fourchettes d'erreur représentent les écarts types.



La dépendance du niveau de bruit CPL par rapport à la distance a été étudiée en considérant que la fuite du champ électrique *E* était proportionnelle à une loi de puissance de la distance *r*, à savoir:

$$E \propto r^{-\alpha} \tag{A3-1}$$

où α est un coefficient d'affaiblissement. Les coefficients, calculés à partir de mesures effectuées avec deux antennes T2FD, sont dispersés dans le domaine fréquentiel, mais ils se répartissent autour de 1,0.

Pour évaluer le niveau des fuites d'émission de façon quantitative, les antennes T2FD ont été étalonnées. Pour ce faire, une antenne-cadre de référence (Anritsu MP414B) a été placée juste au-dessous de l'antenne T2FD et les intensités de champ électrique de quelques fréquences de radiodiffusion ont été mesurées simultanément sur les deux antennes. Le facteur d'antenne K de la T2FD a été calculé comme suit:

$$K = E/V \tag{A3-2}$$

où V (μV) et E (μV/m) correspondent respectivement aux sorties de l'antenne T2FD et de l'antenne-cadre de référence. A titre d'exemple, le facteur de l'antenne T2FD à 9,6 MHz a été mesuré à −8,0 ± 2,5 dB. En appliquant la méthode des moments à l'antenne T2FD, on a calculé un gain G_a de 2,3 dBi à 9,6 MHz. Le facteur d'antenne s'obtient également à partir du gain de l'antenne par la formule:

$$K = \sqrt{\frac{4\pi\eta_0}{Z_0 G_0 \lambda^2}} \tag{A3-3}$$

où η_0 est l'impédance d'onde égale à 120π, Z_0 vaut 50 Ω, et λ correspond à la longueur d'onde. En utilisant l'équation 3 et un affaiblissement de transmission via le câble coaxial de 0,8 dB, on obtient un facteur d'antenne de −5,8 dB, ce qui est cohérent avec la valeur estimée lors de l'étalonnage.

La Fig. A3-32 présente une comparaison entre le bruit produit par les systèmes CPL et le niveau de bruit galactique calculé à partir de spectres galactiques[60] connus et des facteurs d'étalonnage de l'antenne. Le niveau de bruit produit par les systèmes CPL dépasse de plus de 30 dB le niveau de bruit galactique.

A3.4.4 Rayonnements non essentiels dans la bande des fréquences décimétriques

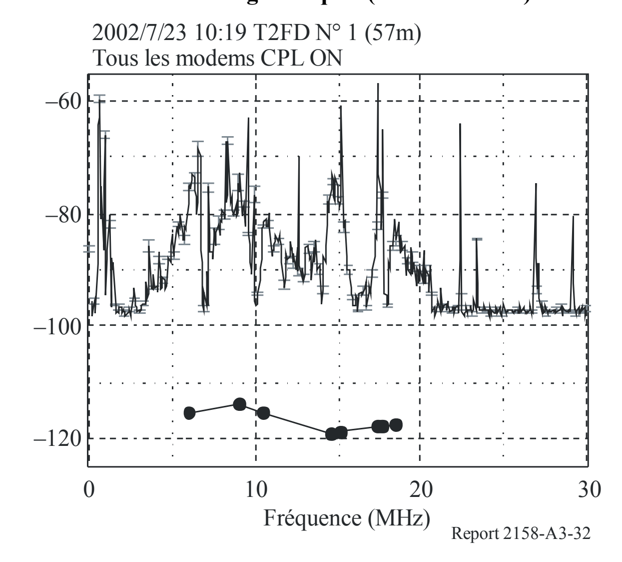
La bande des fréquences décimétriques est une fenêtre atmosphérique utilisée pour les observations radioastronomiques, qui permet de mesurer de faibles sources radioélectriques avec une très grande sensibilité. Même si les modems CPL à large bande n'utilisent pas cette bande de fréquences élevées, il convient d'examiner les niveaux de rayonnements parasites causés par ces modems dans cette bande.

---

[60] ALEXANDER J. K., BROWN L.W., CLARK T.A., STONE R.G. et WEBER R.R. «The Spectrum of the Cosmic Radio Background between 0.4 and 6.5 MHz», *Astrophys. J.*, 157, L163, 1969.

FIGURE A3-32

Spectre dans la bande des fréquences décamétriques mesuré par l'antenne T2FD n° 1 lorsque tous les modems CPL sont en fonctionnement (tracé supérieur) et niveau estimé des émissions galactiques (tracé inférieur)

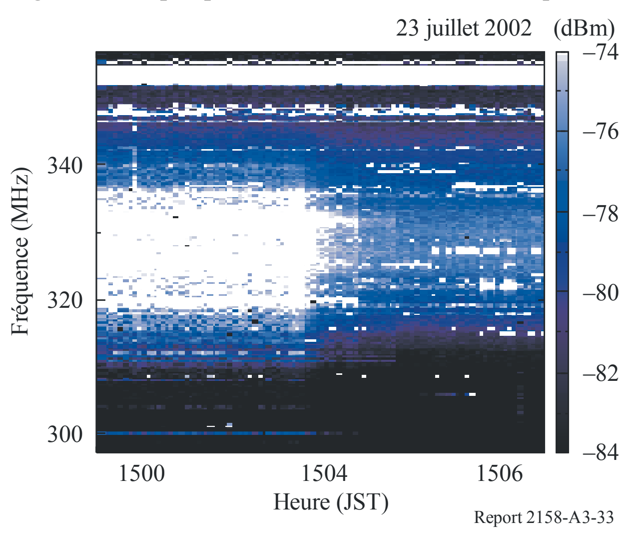


La Fig. A3-33 présente un spectre dynamique dans la bande des fréquences comprises entre 297 et 357 MHz lors d'une utilisation des modems CPL 3/4. La figure le montre clairement, le bruit à large bande et quelques émissions à bande étroite disparaissent à l'extinction des modems, à 15 h 04. Autrement dit, on observe, sans doute possible, des rayonnements parasites causés par les modems CPL.

Les émissions non essentielles produites par les modems soumis aux essais ne s'expliquent pas de façon évidente. Il serait donc nécessaire de mener des études complémentaires afin de rechercher la production d'harmoniques et/ou de produits d'intermodulation dans les modems. En outre, lorsque les modems CPL mettent en œuvre des filtres coupe-bande, la présence d'éléments non linéaires dans le câblage du réseau électrique peut entraîner des produits d'intermodulation et générer des signaux parasites dans les bandes de coupure.

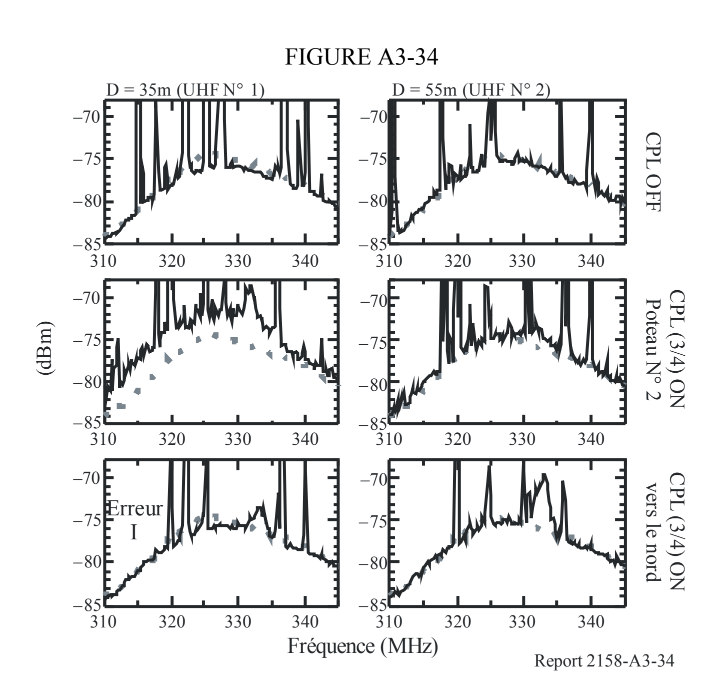
FIGURE A3-33

Spectre dynamique au voisinage de 327 MHz Dès l'extinction des modems 3/4 à 15 h 04, le bruit à large bande et quelques émissions à bande étroite disparaissent



La Fig. A3-34 montre la dépendance du niveau des rayonnements parasites avec la distance et la direction de l'antenne log-périodique par rapport aux équipements CPL. Lorsque tous les modems CPL sont éteints ou que l'antenne n'est pas dirigée vers les équipements CPL, aucun rayonnement parasite n'est détecté. En revanche, des rayonnements non essentiels de forte intensité sont reçus lorsque l'antenne se situe à proximité des équipements CPL et qu'elle est orientée dans leur direction. A la position UHF n° 1, l'augmentation du bruit de fond atteint environ 4 dB. Ces résultats indiquent la présence de rayonnements parasites causés par les modems CPL dans la bande des fréquences décimétriques.

FIGURE A3-34



La dépendance du niveau de bruit des CPL avec la distance a également été évaluée dans la bande des fréquences décimétriques. Le calcul du coefficient d'affaiblissement à partir de l'équation 1 donne 1,3, ce qui est proche mais légèrement supérieur à la valeur en champ lointain.

Dépendance des émissions parasites avec la distance et l'orientation de l'antenne log-périodique par rapport aux équipements CPL: mesures effectuées à la position 35 m (à gauche) et à la position 55 m (à droite). Figures du haut: les modems CPL ne sont pas en exploitation. Figures du milieu: les modems 3/4 fonctionnent et l'antenne est dirigée vers le poteau n° 2. Figures du bas: même configuration que pour les figures du milieu, mais l'antenne pointe dans la direction opposée. Dans chaque figure, les tracés continus correspondent aux spectres moyennés au voisinage de 327 MHz et les lignes grises en pointillés au spectre observé lorsque l'entrée du récepteur est fermée. Quelques bruits d'origine externe, sans rapport avec les CPL, ont également été mis en évidence. Ils se présentent sous la forme d'émissions à bande étroite reçues lorsque tous les modems sont éteints et que l'antenne est dirigée vers le nord. Une fourchette type d'erreur sur les mesures est indiquée dans la figure en bas à gauche.

A3.4.5 Comparaison des niveaux de bruit CPL avec la Recommandation UIT-R RA.769 à 327 MHz

La Recommandation UIT-R RA.769 fournit les niveaux de seuil de brouillage préjudiciables au service de radioastronomie. A 327 MHz, les niveaux de rayonnements parasites provenant des équipements CPL ont été calculés aux deux fréquences et comparés avec les niveaux de seuil. La bande de fréquences voisines de 327 MHz est attribuée au service de radioastronomie à titre

primaire et, d'après la Recommandation UIT-R RA.769, le niveau de seuil de brouillage préjudiciable aux observations de radioastronomie est de −258 (dB(W/(m^2 · Hz))). D'après la Fig. A3-34, les niveaux de bruit en UHF n° 1 au voisinage de 327 MHz sont de −72,1 dBm lorsque les modems CPL 3/4 sont en service et de −75,9 dBm lorsqu'ils sont éteints. Compte tenu du gain du système de 51,2 dB, de la largeur de bande mesurée de 100 kHz et du gain d'antenne de 12 dBi, la densité spectrale de puissance surfacique des rayonnements non essentiels est estimée à –206 (dB(W/(m^2 · Hz))). En appliquant le coefficient d'affaiblissement en champ lointain de 1,0, la distance de séparation nécessaire pour protéger les observatoires de radioastronomie a été évaluée à 12 km environ (voir Tableau A3-5).

TABLEAU A3-5

Distance de séparation nécessaire pour protéger le service de radioastronomie des systèmes CPL à 327 MHz

Fréquence (MHz)	327
Niveau de seuil (dB(W/(m^2 · Hz)))	–258
Rayonnements CPL non essentiels (dB(W/(m^2 · Hz)))	–206
Distance par rapport au poteau n° 2 (m)	35
Distance de séparation (km)	12

Il était également prévu de faire des calculs analogues à 13,5 MHz, mais les niveaux mesurés des fuites d'émissions à 180 m (T2FD n° 2) étaient trop proches du plancher de bruit pour garantir une bonne fiabilité des calculs.

A3.4.6 Conclusions

Les mesures de spectre effectuées dans la bande des fréquences décamétriques ont montré que les modems CPL de type *Access* augmentent considérablement les niveaux de plancher de bruit. D'après les observations, les niveaux des fuites d'émissions sont très supérieurs aux niveaux des signaux observés en radioastronomie. Les essais dans la bande des fréquences décimétriques ont montré que les modems CPL étaient à l'origine des rayonnements parasites. Dans les deux bandes de fréquences, les fuites d'émissions causées par les modems CPL étaient très supérieures aux niveaux des seuils de brouillage préjudiciable au service de radioastronomie qui sont spécifiés dans la Recommandation UIT-R RA.769. D'après les essais, à 327 MHz, la distance de séparation nécessaire pour protéger les observatoires de radioastronomie des rayonnements parasites causés par une seule paire de modems CPL de type *Access* est de 12 km environ. Si les modems CPL de type *Access* étaient généralisés, les niveaux des fuites d'émissions cumulées seraient considérablement augmentés et il serait nécessaire de respecter une distance de séparation beaucoup plus grande.

Pour les besoins des études visant à définir les limites des puissances de sortie des modems CPL, les présentes analyses montrent clairement que les fuites d'émissions des modems dont la densité spectrale de puissance est égale à −50 dBm/Hz augmentent considérablement le plancher de bruit ambiant et sont susceptibles de causer de graves brouillages. Pour que ces limites soient efficaces dans la pratique, il importe de prendre en compte plusieurs facteurs, notamment l'effet cumulatif de multiples unités CPL, la distance par rapport aux récepteurs susceptibles d'être brouillés et les trajets de propagation vers ces récepteurs, ainsi que les caractéristiques de câblage des réseaux électriques réels.

A3.5 Mesures des distances de séparation

A3.5.1 Mesures des distances de séparation au Brésil

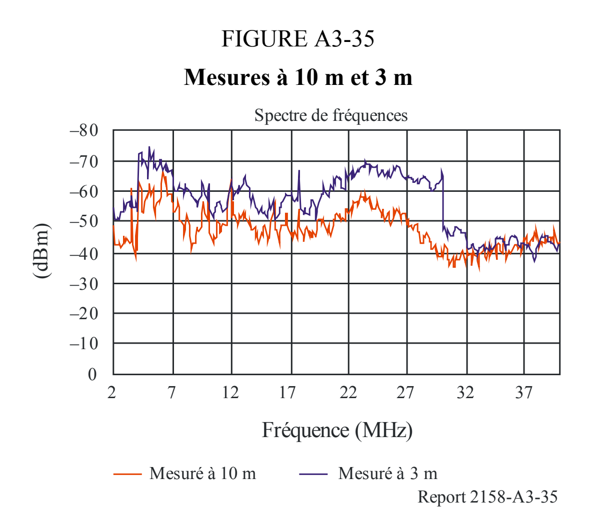
La relation entre l'intensité de champ et la distance a été étudiée afin de déterminer, d'une part, la taille de la zone d'exclusion nécessaire pour protéger les stations en ondes décamétriques contre les brouillages causés par les CPL et, d'autre part, le facteur d'extrapolation à utiliser dans les mesures. La Fig. A3-35 illustre l'intensité de champ mesurée à des distances horizontales de 3 m et 10 m.

De 3 m à 10 m, l'intensité de champ mesurée diminue en moyenne de 11,7 dB pour des fréquences comprises entre 4 MHz et 30 MHz.

Les résultats montrent qu'un facteur d'extrapolation de 40 dB/décade fournit une bonne approximation en première intention. Le calcul conduit en effet à une diminution moyenne du champ de 9,47 dB (soit une différence de 2,3 dB) pour un affaiblissement en visibilité directe.

FIGURE A3-35

Mesures à 10 m et 3 m



A3.5.2 Mesures des distances de séparation au Canada

Le Centre canadien de recherche sur les communications a étudié le ratio des intensités de champ RF observées à 3 m et à 10 m afin de mieux comprendre les affaiblissements de propagation aux fréquences d'exploitation des systèmes CPL. Le ratio théorique entre l'intensité de champ mesurée à 3 m et celle mesurée à 10 m peut être déterminé à partir de l'équation de propagation en espace libre. Etant donné qu'il s'agit d'un rapport, l'équation peut être simplifiée, ce qui donne:

$$\text{Ratio des intensités de champ}_{(\text{dB})} = 20 \log\left(\frac{10\,\text{m}}{3\,\text{m}}\right) \approx 10{,}5 \text{ dB}$$

L'équation ci-dessus repose sur l'hypothèse d'un facteur d'extrapolation de 20 dB par décade de distance pour une propagation en espace libre. En théorie, la puissance observée à 3 m des habitations devrait donc être supérieure de 10,5 dB à celle observée à 10 m.

La Fig. A3-36 présente le ratio «intensité de champ à 3 m/intensité de champ à 10 m» pour chaque dispositif de chaque site d'essai. Les calculs ont été restreints à l'intervalle 16-28 MHz pour réduire les effets du bruit ambiant. Le ratio des intensités de champ moyenné sur l'ensemble des dispositifs et des sites d'essais est égal à 9,56 dB, soit 1 dB de moins que la valeur théorique. Le facteur d'extrapolation déterminé à partir de ces résultats d'essais est donc de 18,2 dB par décade de distance.

FIGURE A3-36

Ratio «intensité de champ à 3 m/intensité de champ à 10 m» sur chaque site d'essai

* Le site d'essai n° 3, qui figure sur le graphique, n'a pas été pris en compte pour le calcul de la moyenne en raison de brouillages CPL provenant d'une maison adjacente.

Report 2158-A3-36

A3.5.3 Dépendance des fuites de champ électrique causées par des systèmes CPL de type *Indoor* par rapport à la distance – mesures de séparation effectuées au Japon

A3.5.3.1 Introduction

Pour étudier et déterminer les conditions de compatibilité relatives à la coexistence des systèmes CPL et des systèmes de radiocommunication conformes au Règlement des radiocommunications, il importe d'avoir des éléments d'information sur la dépendance avec la distance (c'est-à-dire la diminution du champ électrique en fonction de la distance par rapport à un bâtiment dans lequel fonctionnent des modems CPL de type *Indoor*). A cette fin, une étude a été menée pour mesurer les fuites de champ électrique à des distances de 5, 10 et 30 m du mur extérieur d'une maison équipée de systèmes CPL de type *Indoor*. Cette étude a permis de déterminer comment l'intensité de champ varie en fonction de la distance et de la longueur d'onde.

A3.5.3.2 Mesures[61]

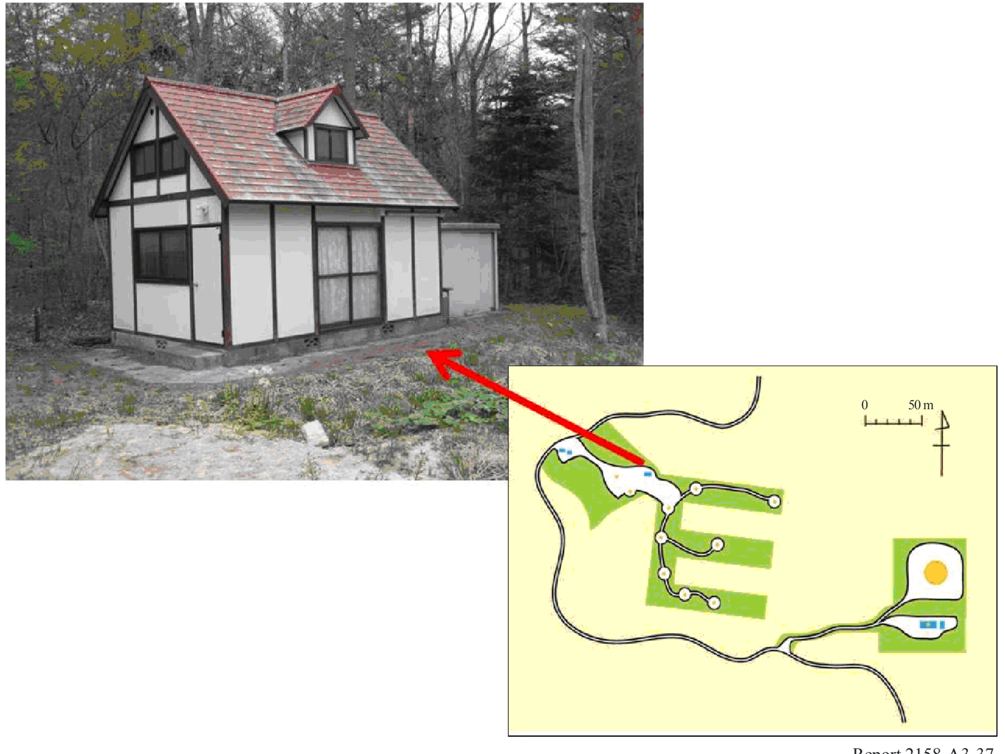
Les mesures ont été réalisées dans un environnement rural réel, sur une maison de bois à un étage (voir Fig. A3-37). La maison, de coordonnées 37° 42' N et 140° 40' E, se situe dans une zone montagneuse reculée. Bien qu'elle soit entourée de forêts, les dégagements vers l'ouest, le sud et le sud-est sont suffisants.

---

[61] OHISHI M., KITAGAWA M., MISAWA H. et TSUCHIYA F., «Leaked emissions due to the in-house broadband power line communications (1) – Measurement of the electric field strength at a distance and direct measurements of the common-mode current», *IEIEC Tech. Rep.*, EMCJ2009-40, septembre 2009.

FIGURE A3-37

Maison utilisée pour les mesures et carte topographique des environs



Report 2158-A3-37

Les points de mesure des fuites de champ électrique se situent à 5 m, 10 m et 30 m des murs extérieurs de la maison, vers l'ouest, le sud et le sud-est. L'antenne utilisée est une antenne-cadre passive (ETS-Lindgren 6512; 60 cm ϕ), placée à une hauteur d'1 m (bord inférieur). La sortie de l'antenne a été mesurée à l'aide d'un analyseur de spectre (NEC SpeCAT2) avec une excursion en fréquence de 2 à 26 MHz par incréments de 8 kHz et une bande de résolution de 8 kHz. Les mesures ont été réalisées dans le mode RMS et enregistrées en MAXHOLD. Les trois composantes indépendantes du champ électrique de fuite (dans les directions x, y et z) ont été mesurées à chaque point de mesure, puis elles ont servi à calculer l'intensité du champ électrique total.

Le courant en mode commun à l'intérieur de la maison a également été mesuré. Etant donné que les lignes électriques intérieures de cette maison étaient apparentes sur ses murs intérieurs, il a été possible d'effectuer des mesures directes du courant en mode commun en différents points le long des lignes à l'aide d'une sonde de courant. La puissance de sortie au niveau de la sonde a été mesurée avec le même analyseur de spectre que celui utilisé pour les mesures de champ, avec la même excursion en fréquence, les mêmes points de mesure, la même bande de résolution et le même mode de mesure. Le courant en mode commun a été déterminé à partir de la puissance de sortie de la sonde de courant. Les courants en mode commun et en mode différentiel en sortie des modems CPL ont été mesurés en appliquant la même procédure.

Les modems CPL de type *Indoor* utilisés sont en vente au Japon. Le Tableau A3-6 en recense les caractéristiques principales. Deux modems ont été branchés sur des prises de courant à l'intérieur de la maison. Chacun était connecté à un ordinateur personnel. Une transmission de données a été effectuée en envoyant un gros fichier d'un ordinateur à l'autre via les modems CPL. Les mesures des fuites de champ électrique et des courants ont été réalisées pendant le transfert du fichier. Pour mesurer le bruit ambiant, les modems CPL ont été débranchés.

TABLEAU A3-6

Modems CPL utilisés pour les mesures

Norme CPL	Gamme de fréquences (MHz)	Débit binaire (couche physique) (Mbit/s)
HD-PLC	2-28	210
UPA	2-30	200

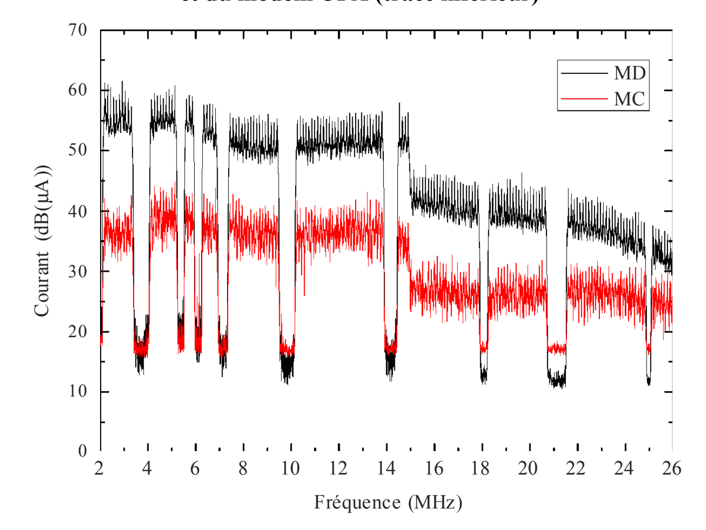
A3.5.3.3 Données mesurées

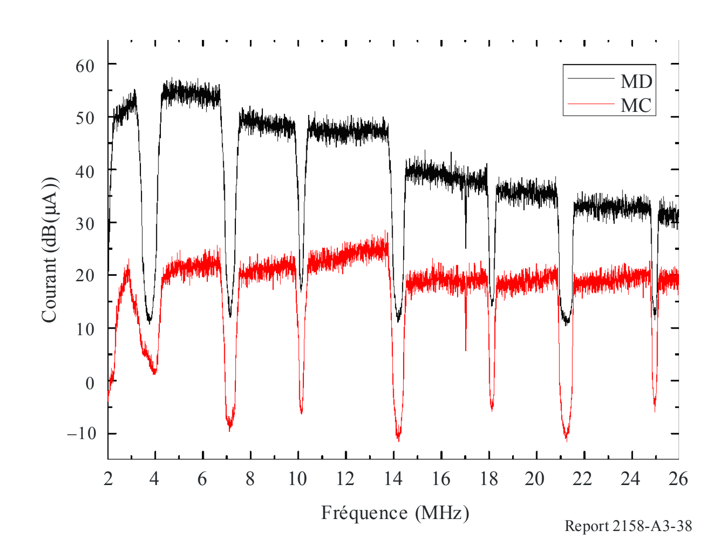
La Fig. A3-38 présente les courants en mode différentiel et en mode commun mesurés juste après les ports de sortie des modems CPL. Pour transférer les données, le modem CPL injecte un courant en mode différentiel dans la ligne électrique. Une fraction du courant en mode différentiel est convertie en courant en mode commun au niveau des éléments de dissymétrie rencontrés le long de la ligne électrique, le cas échéant. Le degré de conversion dépend des éléments dissymétriques présents sur la ligne. Les courants en mode commun présentés à la Fig. A3-38 ne correspondent pas aux courants convertis, mais à ceux produits dans le modem CPL lui-même (courants en mode commun injectés).

Les Figs A3-39 à A3-41 illustrent l'intensité des fuites de champ électrique dans le cas du modem HD-PLC, respectivement vers le sud, le sud-est et l'ouest.

FIGURE A3-38

Courant en mode différentiel (MD) et courant en mode commun (MC) dans le cas du modem HD-PLC (tracé supérieur) et du modem UPA (tracé inférieur)

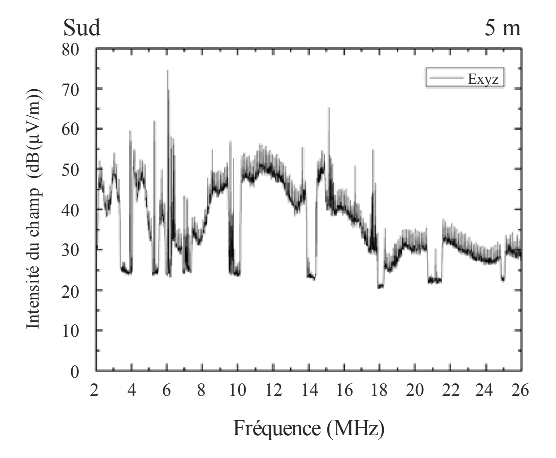


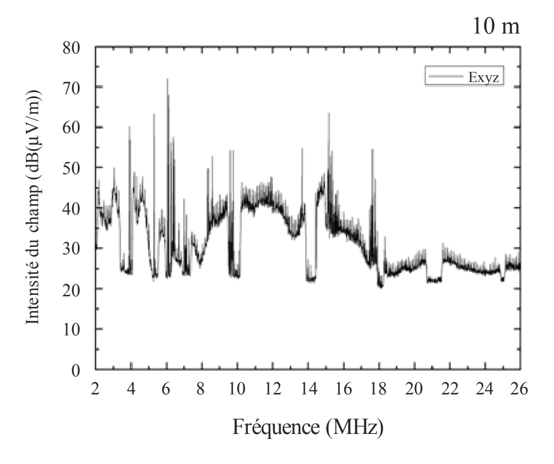


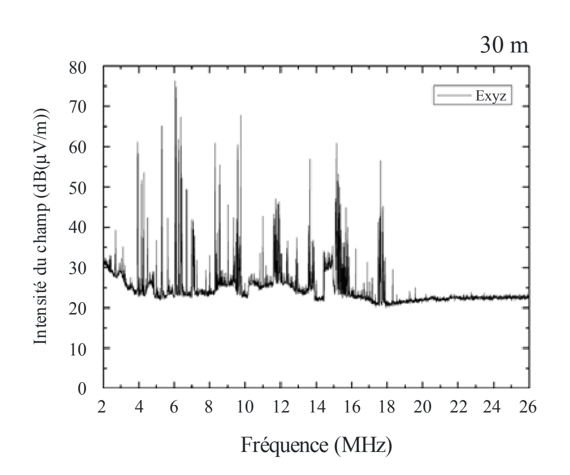
Report 2158-A3-38

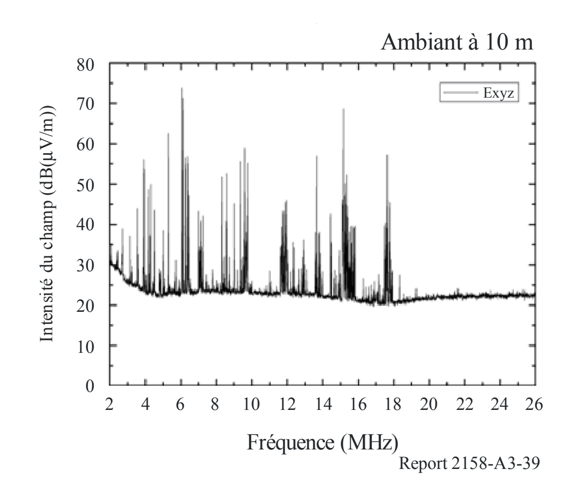
FIGURE A3-39

Intensité du champ électrique de fuite (dB(µV/m)) vers le sud dans le cas du modem HD-PLC





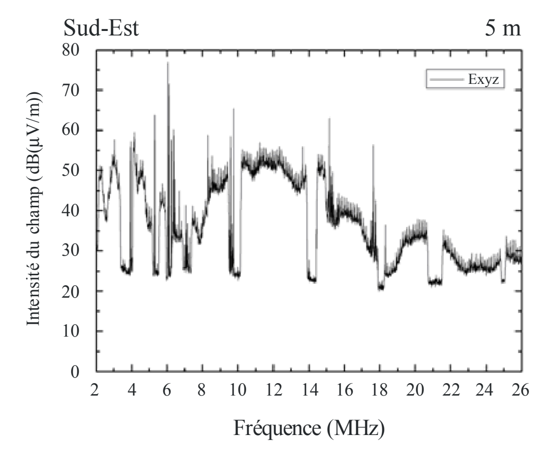


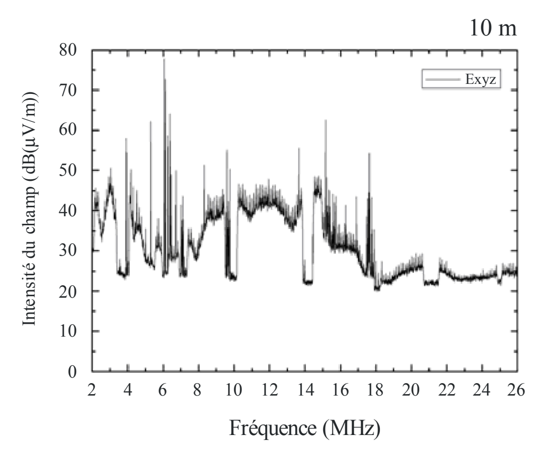


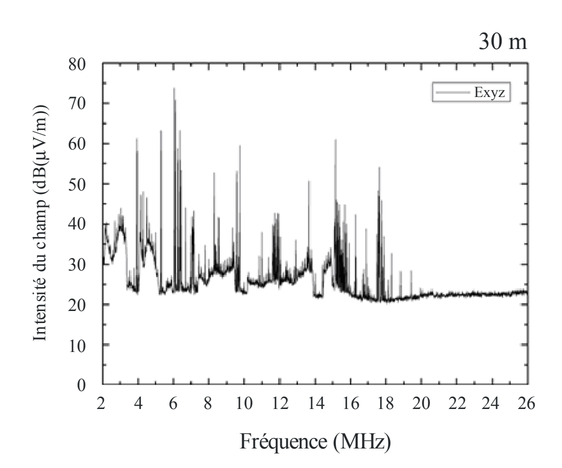
Report 2158-A3-39

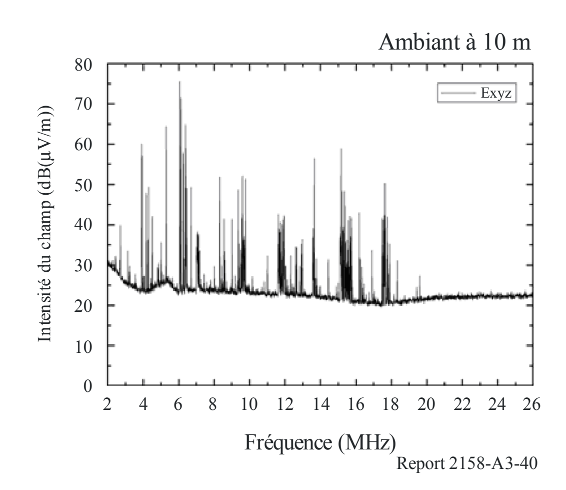
FIGURE A3-40

Intensité du champ électrique de fuite (dB(µV/m)) vers le sud-est dans le cas du modem HD-PLC





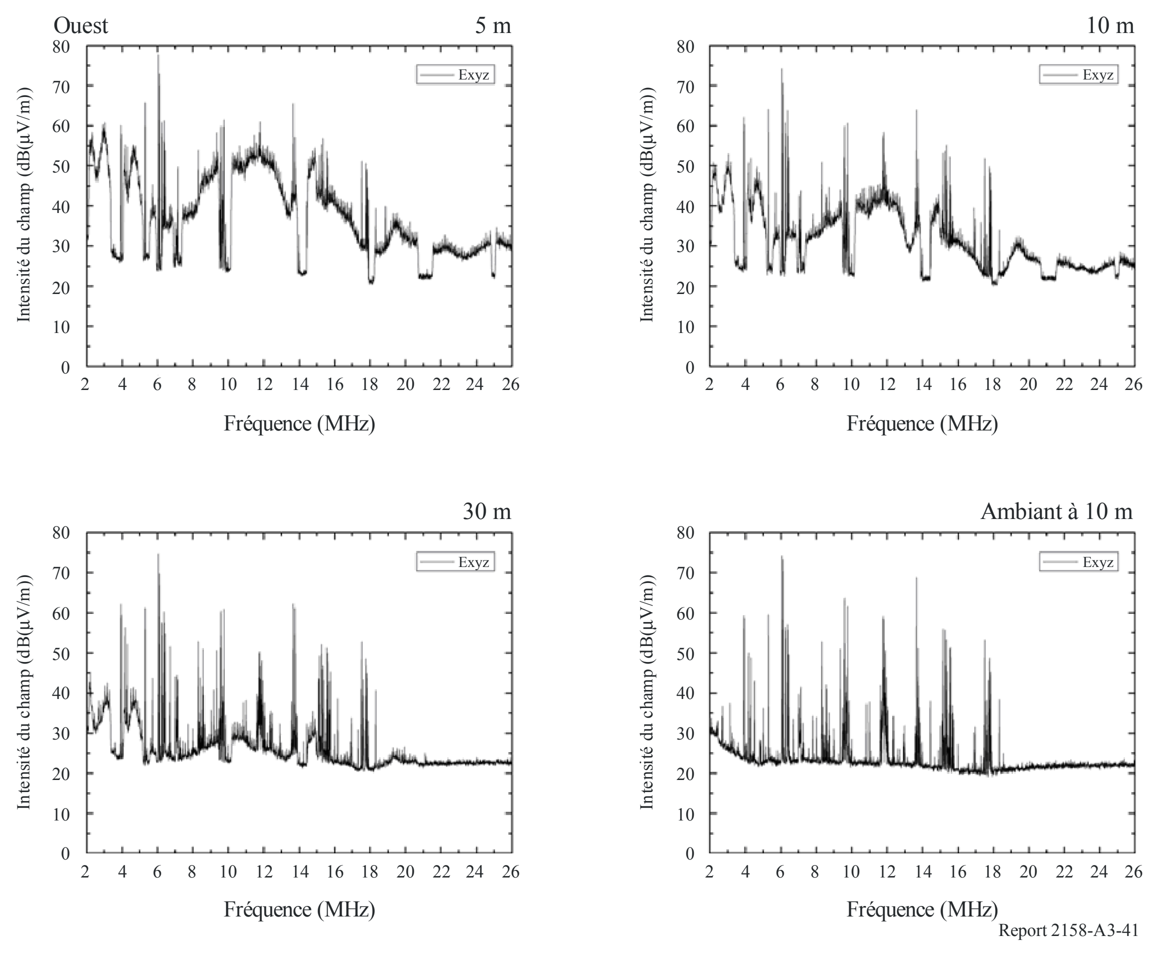




Report 2158-A3-40

FIGURE A3-41

Intensité du champ électrique de fuite (dB(µV/m)) vers l'ouest dans le cas du modem HD-PLC



Les Figs A3-42 à A3-44 illustrent l'intensité des fuites de champ électrique dans le cas du modem UPA, respectivement vers le sud, le sud-est et l'ouest. A noter qu'en raison d'une erreur de mesure, il n'a pas été possible d'inclure les données correspondant au champ électrique présent à une distance de 5 m vers le sud.

FIGURE A3-42

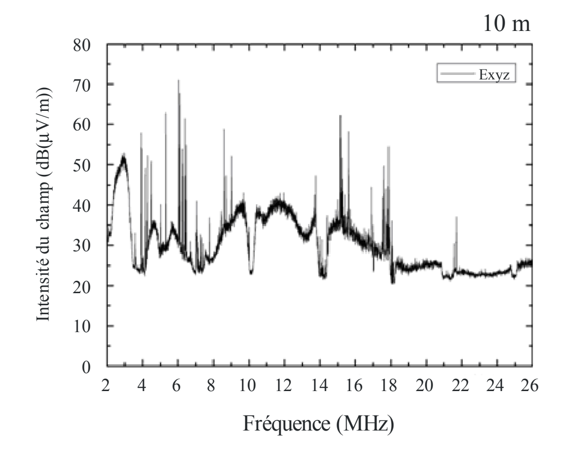
Intensité du champ électrique de fuite (dB(µV/m)) vers le sud dans le cas du modem UPA

Sud

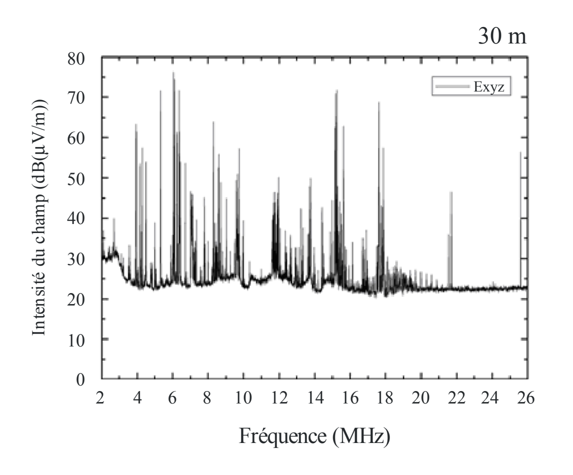
5 m

Pas de données de mesure

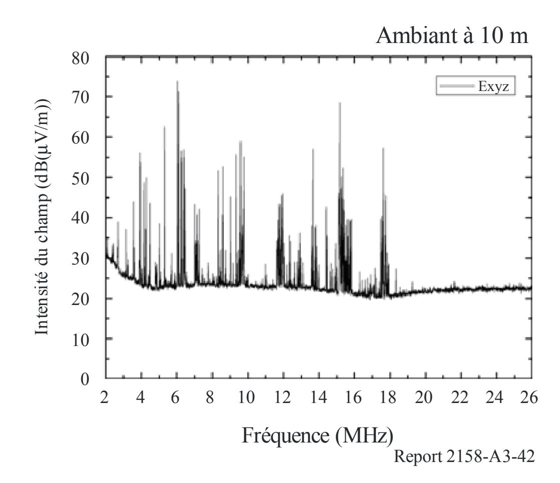
10 m



30 m



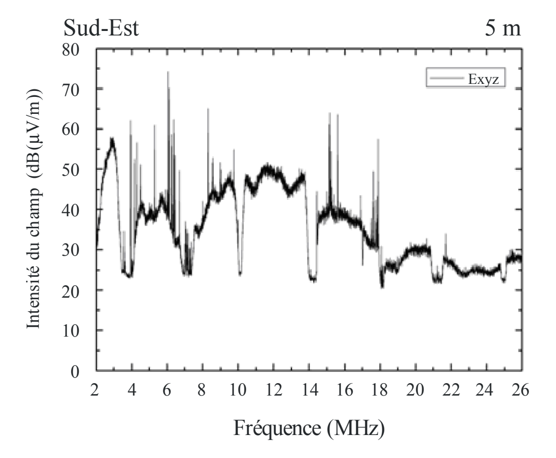
Ambiant à 10 m

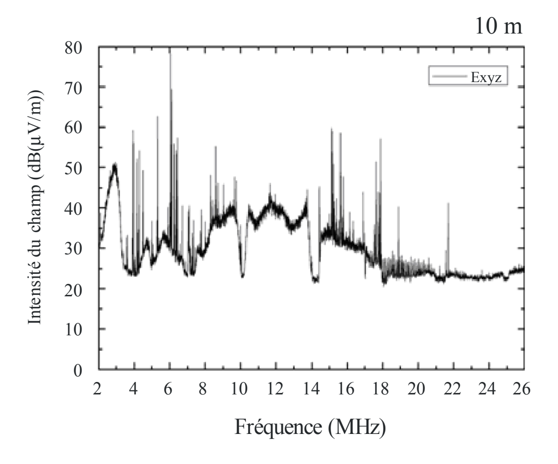


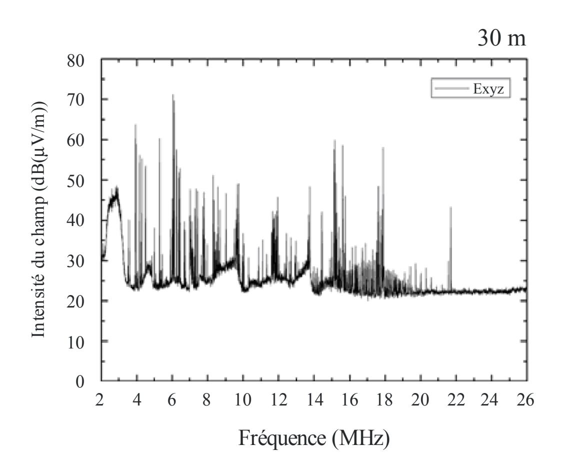
Report 2158-A3-42

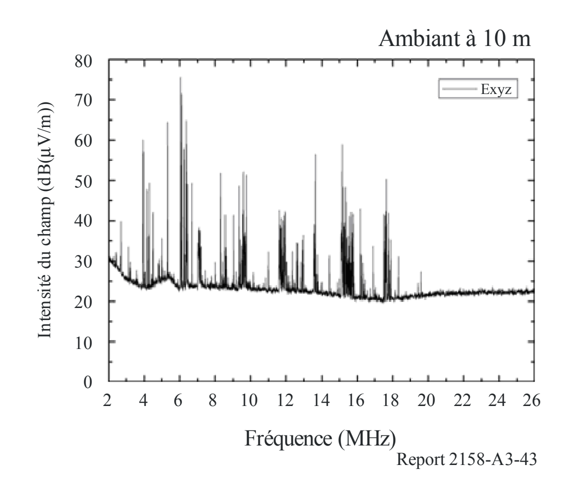
FIGURE A3-43

Intensité du champ électrique de fuite (dB(µV/m)) vers le sud-est dans le cas du modem UPA









Report 2158-A3-43

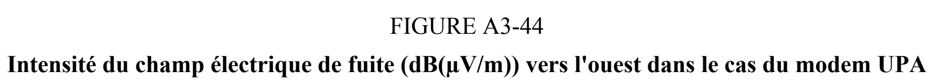
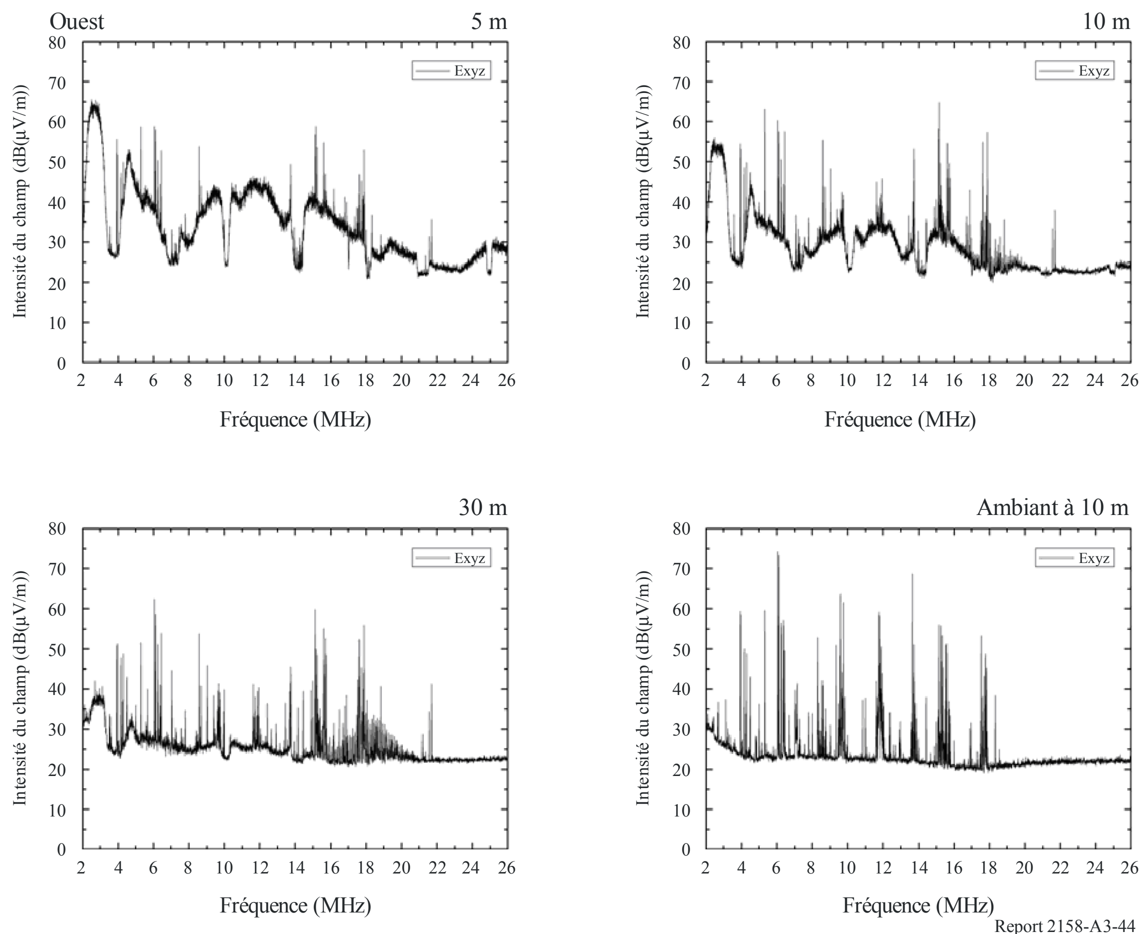


FIGURE A3-44

Intensité du champ électrique de fuite (dB(µV/m)) vers l'ouest dans le cas du modem UPA



La Fig. A3-45 montre la répartition des lignes électriques à l'intérieur de la maison soumise aux mesures, ainsi que les points où ont été effectuées les mesures directes du courant en mode commun. Les dimensions de la maison sont 5,4 × 3,6 m. La distribution électrique dans la maison suit une configuration simple, la plupart des câbles étant directement connectés au tableau de distribution et disposés horizontalement. Trois points de mesure ont été choisis:

– le point 1 (sur la ligne 1) correspond à un emplacement où un câble électrique se sépare en deux;
– le point 2 (sur la ligne 2) correspond à un autre embranchement, qui relie une lampe au réseau;
– le point 3 (sur la ligne 3) est quasiment à l'extrémité d'un câble électrique.

La Fig. A3-46 présente les courants en mode commun mesurés au niveau de ces trois points. Il apparaît clairement que ce courant varie d'un point à l'autre le long du câble électrique. Dans cet exemple, un courant en mode commun maximal d'environ 40 dB(µA) a été mesuré au voisinage de 2,8 MHz au niveau des points 2 et 3. On notera que plusieurs signaux de radiodiffusion sont clairement visibles (par exemple au voisinage de 6 MHz), ce qui prouve que le réseau électrique constituerait une bonne antenne de réception.

FIGURE A3-45

Distribution du réseau électrique à l'intérieur de la maison soumise aux mesures

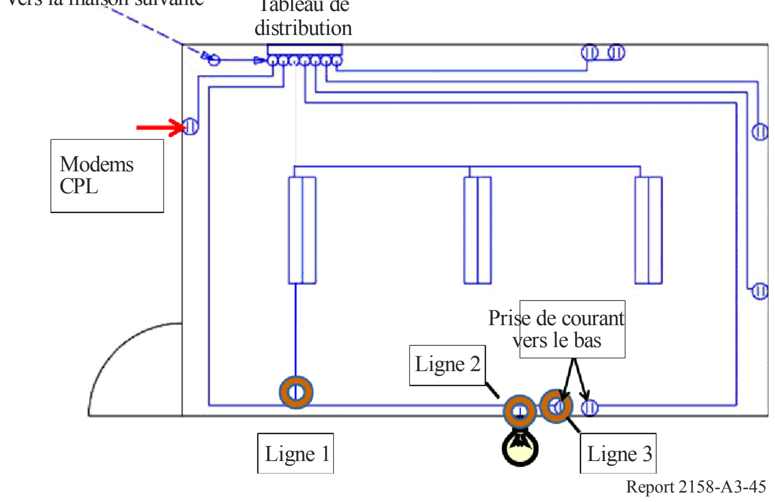
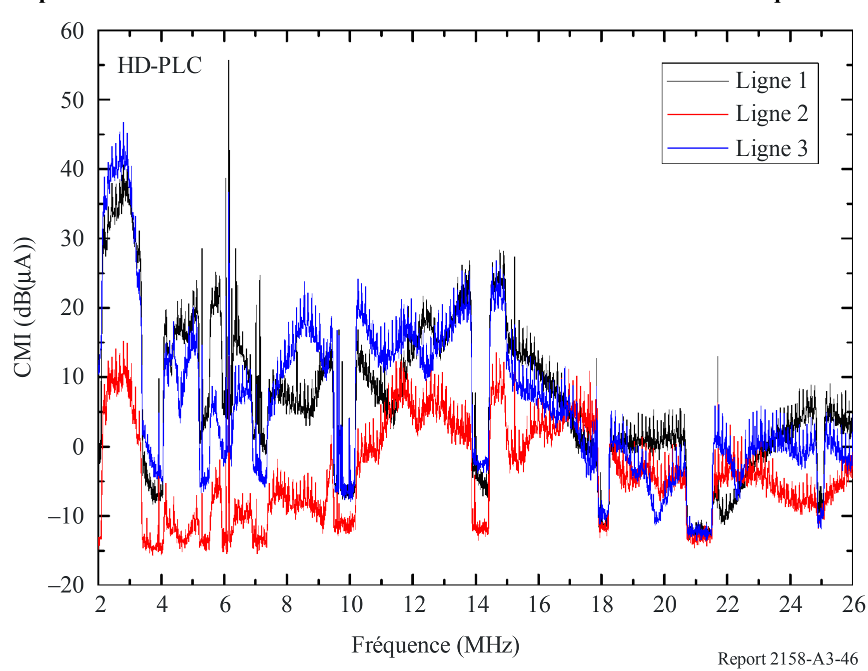


FIGURE A3-46

Exemple de mesure directe du courant en mode commun sur le réseau électrique intérieur



A3.5.3.4 Calcul de la dépendance avec la distance

Pour déterminer la dépendance avec la distance, trois gammes de fréquences ont été choisies: 2 896-3 200 kHz, 10 304-10 592 kHz et 14 502-14 792 kHz. Ce choix s'explique par le fait que les mesures effectives de bruit ambiant (Figs A3-39 à A3-44) n'ont pas fait apparaître de signaux spécifiques correspondant à des services de radiocommunication. Pour chaque gamme de fréquences, on a calculé l'intensité de champ moyenne et son écart type. Les courbes correspondantes sont représentées à la Fig. A3-47.

Dans la gamme des fréquences décamétriques, la limite entre le champ proche et le champ lointain ($\lambda/2\pi$) s'étend approximativement de 25 m (pour 2 MHz) à 1,5 m (pour 30 MHz). Il est nécessaire de prendre cette donnée en compte pour trouver un modèle approprié, capable de rendre compte des

distributions de champ mesurées. On a constaté que le modèle de rayonnement du doublet fournissait une bonne approximation:

$$E = \frac{Z_0 IL}{2\pi D}\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2\pi D}\right)^2+\left(\frac{\lambda}{2\pi D}\right)^4} \qquad \text{(A3-4)}$$

où:

E: intensité du champ

Z_0: impédance de l'espace

I: intensité

L: longueur du câble

λ: longueur d'onde

D: distance.

Dans l'hypothèse où L = 5 m, il est possible de calculer l'intensité du courant, I, en comparant la courbe du modèle et les intensités de champ mesurées. Les valeurs de courant (en mode commun) calculées sont les suivantes: 42 dB(µA) pour la bande des 3 MHz, 24 dB(µA) pour la bande des 10 MHz et 20 dB(µA) pour la bande des 14 MHz. Les courbes du modèle sont également représentées à la Fig. A3-47.

Les valeurs calculées du courant en mode commun représentées à la Fig. A3-47 sont légèrement inférieures aux valeurs mesurées représentées à la Fig. A3-46. En tenant compte des affaiblissements dus aux murs, il serait possible de faire coïncider les valeurs obtenues par mesure directe et les valeurs estimées du courant en mode commun. L'approximation reposant sur le rayonnement d'une antenne doublet serait alors compatible avec la structure simple du réseau électrique (Fig. A3-45)[62].

A3.5.3.5 Résumé

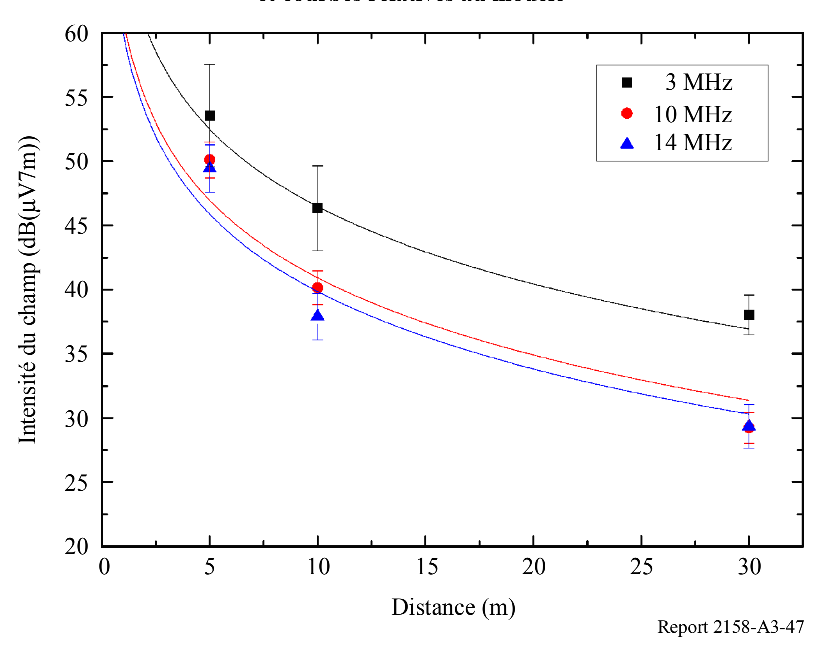
Les fuites de champ électrique et les courants en mode commun le long des câbles d'alimentation ont été mesurés en présence de modems CPL de type *Indoor*. Les mesures ont montré que le modèle de rayonnement d'une antenne doublet serait une bonne approximation pour exprimer la relation entre l'intensité de champ et la distance par rapport à la source de rayonnement.

---

[62] VICK R., *Estimating the radiated emissions of domestic main wiring caused by power-line communication systems*, EMC Zurich Conf., p. 87-92, février 2003.

FIGURE A3-47

Exemple de distribution de l'intensité du champ électrique et courbes relatives au modèle



Dans le cas du champ proche, l'équation (A3-4) peut s'exprimer comme suit:

$$E \approx Z_0 \frac{IL\lambda}{8\pi^2 D^3} \quad \text{pour} \quad \frac{\lambda}{2\pi D} >> 1$$

et dans le cas du champ lointain:

$$E \approx Z_0 \frac{IL}{2\lambda D} \quad \text{pour} \quad \frac{\lambda}{2\pi D} << 1$$

Il ressort de ce qui précède que la relation entre le champ électrique et la distance n'est pas simple (par exemple, 20 dB/décade ou 40 dB/décade) et qu'il convient de la choisir correctement en fonction du rapport entre la longueur d'onde et la distance.

Appendice 1
de l'Annexe 3

Mesures des rayonnements électromagnétiques provenant de dispositifs CPL de type *Indoor* fonctionnant dans un environnement résidentiel – Rapport d'essais sur le terrain

Measurements of EM radiation from in-house Power Line Telecommunication (PLT) devices operating in a residential environment – Field Test Report, Centre de recherche sur les communications (Canada), 24 mars 2009, disponible à l'adresse:

http://www.nabanet.com/nabaweb/members/pdf/itur/CRCReport.pdf
ou l'Annexe 1 du document 1A/176.

Annexe 4

Exemples d'architectures de technologies CPL

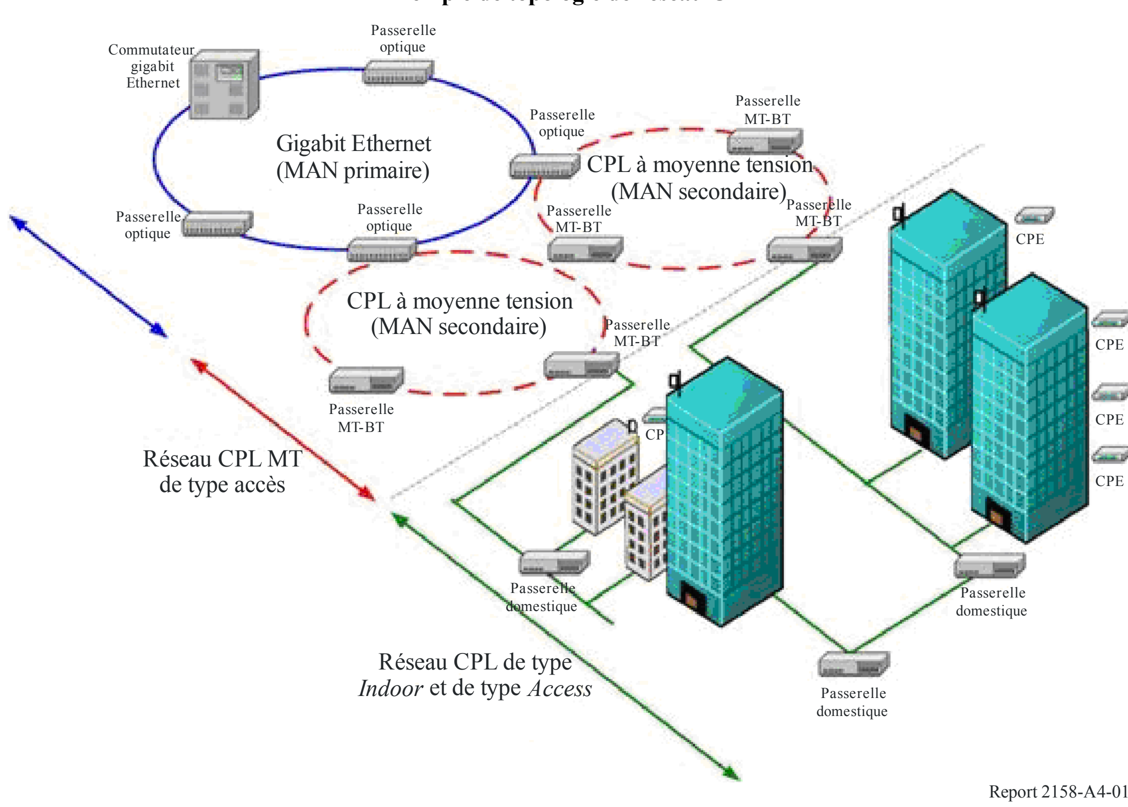
A4 Exemples d'architectures de technologies CPL

A4.1 Exemple de topologie de réseau CPL

La Fig. A4-1 présente un exemple de topologie de réseau CPL, dans lequel le réseau de raccordement optique est connecté aux lignes de distribution électrique à moyenne tension (MT) – ou anneaux – via des passerelles optiques-CPL. Les anneaux MT sont reliés au réseau de distribution électrique à basse tension (BT), sur lequel se connectent les équipements locaux d'abonné (CPE) via des passerelles CPL MT-BT. Les données circulent entre les terminaux installés chez l'abonné (CPE) via des passerelles domestiques à destination et en provenance de têtes de réseau (non représentées), lesquelles sont éventuellement connectées au réseau au niveau de passerelles MT/BT (postes de transformation).

FIGURE A4-1

Exemple de topologie de réseau CPL



L'architecture réseau CPL peut être divisée en trois parties principales, chacune ayant sa propre architecture:

– un réseau de raccordement, en principe un réseau optique en anneau;

– un anneau CPL MT, soit à répartition de fréquence, soit à répartition dans le temps;

– un anneau CPL BT, normalement avec une topologie arborescente ou en étoile.

A4.2 Remarques générales de conception

A4.2.1 Commande d'accès au support physique

L'objectif de la commande d'accès au support physique (MAC) est de répartir l'accès entre les différents abonnés. Elle doit pouvoir gérer plusieurs architectures différentes et prendre en charge:

– une logique maître-esclave, caractérisée par une connexion de données entre l'équipement de tête de réseau (HE) et l'équipement local d'abonné (CPE). Il s'agit de la configuration normale dans le cas des réseaux BT.

– Une logique commande centrale, qui permet une communication directe entre deux équipements du réseau. Cette configuration est normalement utilisée dans les réseaux MT en anneau.

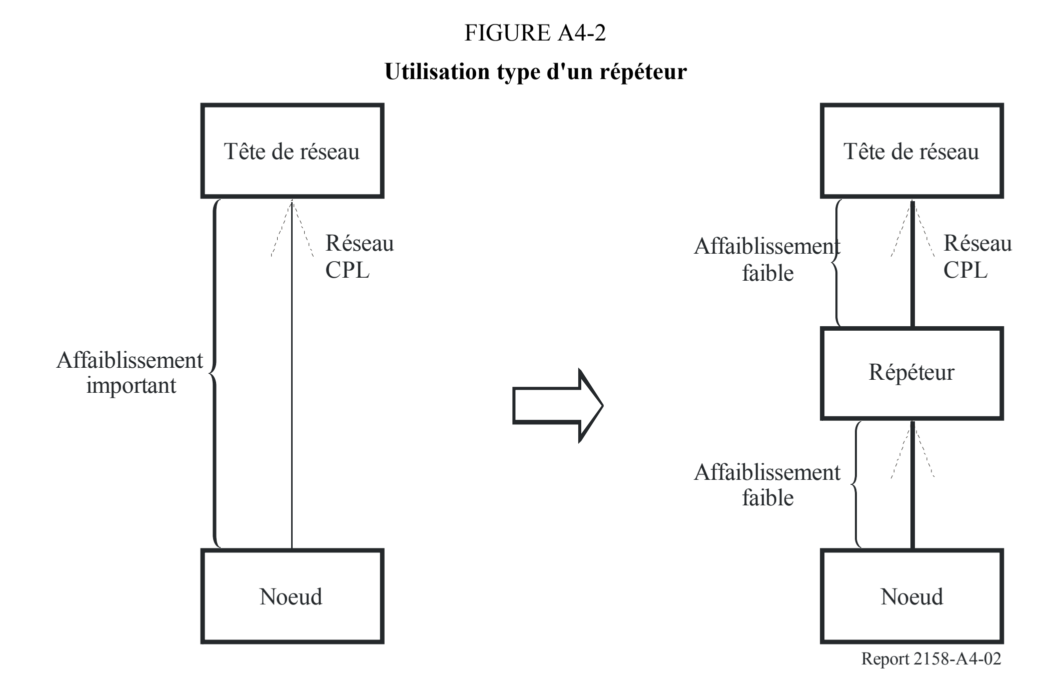
A4.2.2 Répéteurs

En raison de l'affaiblissement important sur les canaux de courants porteurs, il est parfois nécessaire d'utiliser des répéteurs (sur les réseaux MT comme sur les réseaux BT) pour assurer une couverture complète du réseau électrique. Ces répéteurs, non représentés à la Fig. A4-2, peuvent être installés,

lorsque cela s'avère nécessaire, pour garantir un signal de qualité suffisante au niveau de chaque nœud.

FIGURE A4-2

Utilisation type d'un répéteur



A4.2.3 Multiplexage et techniques à accès multiples

Les systèmes CPL peuvent mettre en œuvre différents types de multiplexages et plusieurs techniques à accès multiples:

– répartition en fréquence;

– répartition dans le temps.

Pour éviter les brouillages entre les réseaux MT et BT, chaque réseau CPL peut utiliser une gamme de fréquences différente. Ce principe vaut également à la frontière BT/intérieur. En règle générale, la répartition en fréquence est utilisée entre les réseaux MT et BT. Les répéteurs BT situés au pied des immeubles peuvent également mettre en œuvre cette technique, qui permet une réutilisation des fréquences dans des bâtiments différents. Lorsque les dispositifs CPL ne sont déployés que sur des réseaux BT ou MT, il est possible d'utiliser l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT).

A4.2.4 Distance

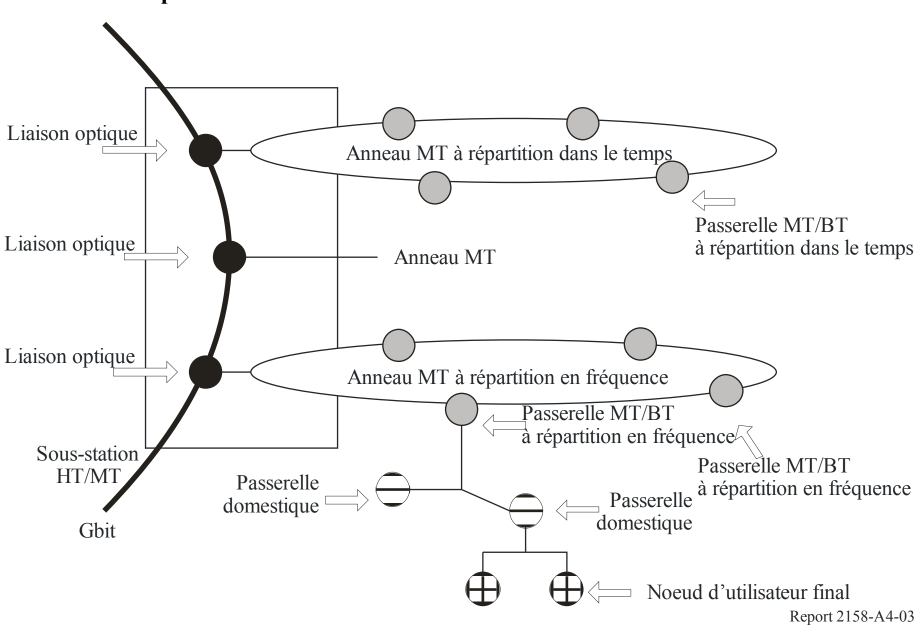
La distance entre deux nœuds du réseau CPL (dans une topologie de type anneau) ou entre la tête de réseau (maître) et la passerelle domestique (esclave) est parfois trop importante pour que l'équipement de réception puisse correctement collecter les données. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser des répéteurs.

A4.3 Architecture des réseaux CPL sur câbles de distribution MT

Dans l'exemple d'architecture MT-CPL présenté à la Fig. A4-3, les anneaux MT sont connectés à un réseau de raccordement optique. Ces réseaux peuvent mettre en œuvre la technique de répartition dans le temps ou de répartition en fréquence, en fonction de la latence requise et des caractéristiques de l'installation. Chaque nœud de l'anneau peut être connecté à un réseau BT-CPL.

FIGURE A4-3

Exemple d'une architecture réseau CPL sur câbles de distribution MT



A4.4 Architecture des réseaux CPL sur câbles de distribution BT

Le réseau CPL sur câbles de distribution BT correspond à la portion finale reliant le réseau de raccordement à l'abonné. Il dépend directement des caractéristiques du réseau électrique qui dessert les locaux de ce dernier. Principaux facteurs qui influent sur l'architecture CPL BT:

Emplacement du réseau – Le réseau CPL peut se situer dans un quartier résidentiel, une zone industrielle ou un quartier d'affaires. Il convient en outre de différencier les zones résidentielles rurales, suburbaines et urbaines. Les zones industrielles et les quartiers d'affaires se caractérisent par un nombre plus élevé de clients potentiels des services CPL. On peut également s'attendre à ce que les abonnés des quartiers d'affaires aient des besoins différents de ceux des zones industrielles et surtout de ceux des quartiers résidentiels. On retrouve de telles différences entre les zones urbaines et les zones rurales.

Densité d'abonnés – le nombre d'utilisateurs/abonnés d'un réseau BT peut varier d'un réseau à l'autre, de même que la densité d'abonnés. Les abonnés peuvent être situés, pour l'essentiel, dans des maisons individuelles (faible densité d'abonnés), ce qui correspond à la configuration habituelle des zones rurales et suburbaines, dans de petits îlots comptant plusieurs abonnés individuels (quartier résidentiel urbain par exemple), dans des bâtiments regroupant un nombre plus important d'appartements ou de bureaux, ou dans des tours à usage résidentiel ou professionnel (très forte densité d'abonnés; grands quartiers commerciaux par exemple).

Longueur du réseau – La plus longue distance entre le transformateur et un abonné d'un réseau BT est également variable. Il existe généralement une différence de longueur importante entre les zones urbaines et les zones rurales.

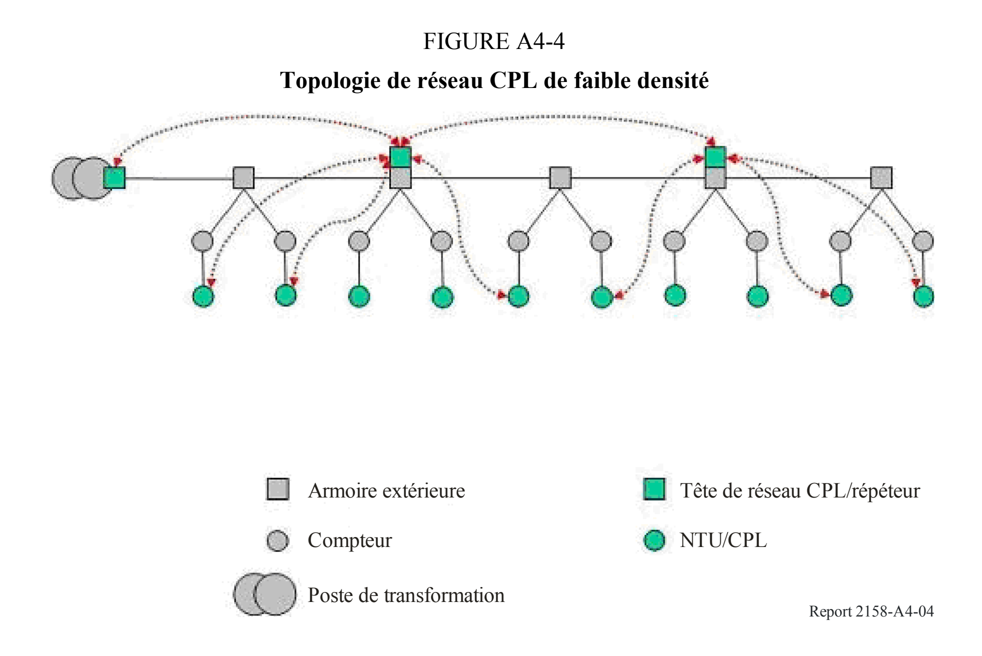
Structure du réseau – Les réseaux à basse tension sont habituellement composés de plusieurs sections (branches) dont le nombre varie, ce qui les différencie également des architectures réseau-réseau.

A4.4.1 Topologie des réseaux CPL de faible densité

Cette topologie est utilisée dans les quartiers résidentiels de faible densité, principalement ceux qui sont constitués de maisons individuelles. Une tête de réseau doit être installée dans le poste de transformation. Pour garantir une bonne qualité de fonctionnement, la distance entre deux répéteurs (ou entre la tête du réseau et un répéteur) ne doit pas dépasser 100 m, ce qui revient normalement à prévoir un maximum de deux armoires extérieures entre deux répéteurs. Une autre condition à observer concerne la distance entre les répéteurs et les unités de terminaison de réseau (NTU). A certains endroits, il est nécessaire d'installer des répéteurs supplémentaires dans des armoires extérieures intermédiaires afin d'améliorer la qualité de fonctionnement au niveau de tel ou tel abonné. La Fig. A4-4 illustre un exemple de déploiement de cette topologie. Sur une ligne d'alimentation de 300 m de long, on trouve en principe trois ou quatre répéteurs. Les lignes pointillées de la Fig. A4-4 montrent que les données de certaines NTU doivent transiter via une seconde armoire extérieure avant d'atteindre un répéteur.

FIGURE A4-4

Topologie de réseau CPL de faible densité



A4.4.2 Topologies de réseau CPL de forte densité

Ces topologies s'appliquent à des zones de forte intensité composées d'immeubles. Les compteurs sont parfois regroupés dans un local comptage, auquel le transformateur est alors directement relié. Deux cas de figure se présentent: soit la ligne d'alimentation entre directement dans le local comptage (topologies arborescentes), soit elle dessert plusieurs locaux comptage (topologie en étoile). Ces deux topologies sont présentées dans les paragraphes qui suivent. A noter que, dans certains cas, il n'y a qu'un seul compteur entre le transformateur et le câblage de l'immeuble.

A4.4.3 Topologie de réseau CPL en étoile

Dans cette topologie, il est nécessaire d'installer une tête de réseau dans le poste de transformation. Les répéteurs sont d'ordinaire installés dans les locaux comptage, sauf lorsque la distance entre le transformateur et le local comptage est trop importante, auquel cas il convient de mettre en place des répéteurs supplémentaires dans des armoires extérieures intermédiaires.

FIGURE A4-5

Exemple de topologie de réseau CPL en étoile

Local comptage
Armoire extérieure
Tête de réseau CPL/répéteur
Compteur
NTU CPL
Poste de transformation
Report 2158-A4-05

A4.4.4 Topologie de réseau CPL en arborescence

Dans cette topologie, une tête de réseau doit être installée dans le poste de transformation et un répéteur dans chaque local comptage.

A4.4.5 Topologie de réseau CPL multi-étages

Cette topologie s'applique aux zones de forte densité composées d'immeubles dans lesquels les compteurs sont éventuellement répartis sur plusieurs étages.

Dans une telle configuration, il est nécessaire d'installer une tête de réseau dans le poste de transformation. En règle générale, chaque bâtiment est équipé d'un répéteur, qu'il convient de placer au plus près du centre du bâtiment pour en assurer une couverture complète, en veillant toutefois à ce que le répéteur reste visible du maître ou d'un autre répéteur. Par exemple, dans un bâtiment de cinq étages, le répéteur devra en principe être placé au deuxième étage, mais on optera pour le premier, si nécessaire, pour augmenter le débit entre le répéteur et la tête de réseau. Comme le montre la Fig. A4-7, dans un bâtiment à deux étages, le répéteur devra être placé entre le rez-de-chaussée et le premier.

FIGURE A4-6

Exemple de topologie de réseau CPL en arborescence

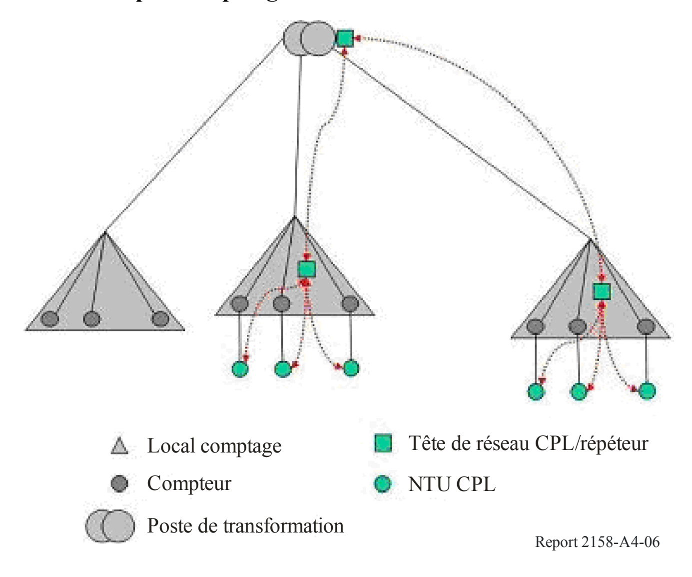


FIGURE A4-7

Exemple de topologie de réseau CPL multi-étages

